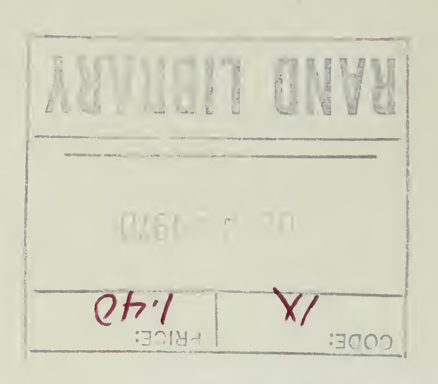
Л. П. КРАЙЗМЕР

УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ




RAND LIBRARY
PRICE:
CODE:


TX345
K9

Kraizmer, Leonid P.

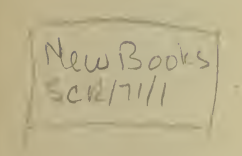
Л. П. КРАЙЗМЕР

УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

(2nd ed., rev. & enl.)

Devices for Storing
Discrete Information





«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1969

УДК 681. 142 65 : 681. 14
6П2. 15
К77

Крайзмер Л. П.

К 77 Устройства хранения дискретной информации. Изд. 2-е, переработ. и доп., Л., «Энергия», 1969.

312 с. с рис.

Книга посвящается одному из важнейших разделов вычислительной техники — устройствам, предназначенным для хранения информации. Рассматриваются принципы действия различных запоминающих элементов и их конструкции, основные схемы и характеристики устройств хранения, а также вопросы применения запоминающих устройств в вычислительной технике и приводятся краткие сведения об их использовании в автоматике, связи, в научном эксперименте и т. д.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занятых в области вычислительной техники, автоматики и смежных областях, а также на студентов электротехнических вузов соответствующих профилей.

3-3-14
206-70

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За истекшие после первого издания книги (1961 г.) восемь лет теория и техника устройств хранения дискретной информации продвинулись далеко вперед. Можно считать, что за эти годы и быстродействие, и емкость запоминающих устройств электронных цифровых вычислительных машин увеличились в среднем приблизительно на порядок. Это было достигнуто как за счет совершенствования устройств, уже описанных в первом издании книги (главным образом запоминающих устройств на различных ферромагнитных элементах), так и за счет разработки в течение последнего десятилетия ряда новых устройств.

К таким новым разработкам, существовавшим в прошлом десятилетии лишь в зародышевом состоянии, можно отнести запоминающие устройства на тонких магнитных пленках, криогенные и оптоэлектронные устройства, запоминающие устройства на новых полупроводниковых приборах — туннельных диодах, металлооксидно-полупроводниковых транзисторах (МОП-транзисторах) и ряд других. Большую революционизирующую роль в улучшении параметров средств хранения информации сыграл и общий прогресс радиоэлектроники в направлении совершенствования технологии, появления интегральных схем, применения в схемах управления новых, значительно более быстродействующих транзисторов и новых схемных решений и т. д.

Все эти обстоятельства вынудили автора почти полностью переработать книгу при подготовке ее второго издания. Учитывая необходимость пополнения книги новым материалом при некотором сокращении ее общего объема, автор вынужден был либо полностью исключить некоторые материалы, либо значительно сократить их изложение. В частности, полностью исключено описание регистров и триггеров, как элементов широко описанных во многих книгах по радиоэлектронике.

Почти втрое сокращен объем описания электростатических устройств хранения на конденсаторах и электроннолучевых трубках, которые находят сейчас весьма ограниченное применение. Более чем втрое сокращена также глава, посвященная устройствам хранения на линиях задержки.

В то же время значительно расширен объем глав, в которых рассматриваются ферритовые сердечники как запоминающие элементы и запоминающие устройства на ферритовых сердечниках. В отдельных главах описаны запоминающие устройства на многоотверстных пластинах и ферритовых элементах со сложным магнитопроводом (гл. 7) и на тонких магнитных пленках (гл. 8). Наряду с материалами первого издания и новыми дополнениями использованы также материалы из книги автора «Быстродействующие ферромагнитные запоминающие устройства», «Энергия», 1964.

Во второе издание введен ряд новых глав. Три из них посвящены некоторым вопросам, общим для всех устройств хранения. Так, в гл. 2 рассматриваются проблемы организации памяти в цифровых машинах и методы поиска и выборки информации. В гл. 15 излагаются краткие сведения о схемах управления и в гл. 16 — о надежности запоминающих устройств.

Кроме того, во втором издании книга дополнена отдельной главой, посвященной постоянным запоминающим устройствам (гл. 14) и тремя главами, в которых излагаются сведения о новых перспективных направлениях техники хранения информации: запоминающих устройствах на полупроводниковых приборах (гл. 10), криогенных (гл. 11), оптических и оптоэлектронных запоминающих устройствах (гл. 13).

Характеристики и параметры запоминающих устройств определяются не только типом выбранных запоминающих элементов, но и характеристиками электронных схем управления. Однако в книге содержится лишь весьма краткое их описание, которое носит обзорный характер. Это продиктовано следующими причинами. Автор был жестко ограничен предельным объемом книги и поэтому, сосредоточивая основное внимание на специфических элементах устройств хранения — запоминающих элементах и их организации в накопители, вынужден был отказаться от подробного описания неспецифических блоков схем управления, таких, как дешифраторы, формирователи, ключи, усилители. Принципиальные сведения о работе этих элементов могут быть почерпнуты из ряда работ по импульсной технике.

Почти полностью обновлен и сокращен по объему список литературы. Во второе издание включены только основополагающие и обзорные литературные источники и те источники, на которые приводятся ссылки в тексте книги.

Учитывая, что первое издание книги уже широко использовалось студентами ряда вузов при изучении некоторых разделов учебных курсов, автор стремился к изложению материала на таком методическом уровне, который обеспечил бы целесообразность использования книги в качестве учебного пособия для студентов соответствующего профиля.

По просьбе автора значительная часть второй главы (за исключением § 2-1) написана Б. П. Кузьминым. Кроме того, автором при написании книги в отдельных местах использованы фрагменты

статей, написанных им совместно с И. Н. Альянахом, Г. И. Анкудиновым, Р. А. Лашевским и др. Автор выражает им всем признательность за сотрудничество.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность всем, прочитавшим рукопись и ее отдельные главы и прежде всего своим сотрудникам по кафедре вычислительной техники Северо-Западного заочного политехнического института за весьма полезные замечания и советы, а также Н. В. Крайзмер и В. З. Гордон, которые оказали большую помощь в подготовке рукописи к печати.

Все пожелания об улучшении книги и замечания об имеющихся в ней недостатках просьба направлять по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Автор

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Разнообразные устройства, предназначенные для хранения информации в дискретной форме, находят в настоящее время широкое применение во многих областях науки и техники. Наибольшее развитие эти устройства получили в течение последнего десятилетия в связи с бурным прогрессом в области электронной вычислительной техники дискретного действия. Запоминающие устройства, разработанные специально для вычислительных машин, все чаще применяются также в автоматике и телеуправлении, в проводной и радиосвязи, в радиолокации, в технике физического эксперимента и других областях.

Однако до настоящего времени ни в отечественной, ни в зарубежной литературе нет работ, в которых рассматривались бы достаточно полно принципы действия различных запоминающих устройств и их применение.

Подобные сведения рассредоточены в большом количестве отдельных статей в советских и иностранных журналах, а также в отдельных главах книг по электронным цифровым вычислительным машинам.

Такое положение затрудняет ознакомление с запоминающими устройствами и выбор подходящего их типа.

Эти соображения и привели автора к мысли создать предлагаемую работу, посвященную изложению основных сведений об устройствах хранения дискретной информации. Ограниченный объем книги заставил отдать предпочтение рассмотрению основных принципов работы устройств и описанию их схем и конструкций перед подробными расчетами отдельных узлов.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УСТРОЙСТВАХ ХРАНЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

1-1. Краткий обзор развития устройств хранения информации

Вся история развития материальной и духовной культуры человеческого общества, как и жизнь каждого отдельного человека, неразрывно связана с процессами получения, накопления, преобразования и использования разнообразной информации и взаимного обмена ею.

С этими процессами, по сути дела, связана жизнедеятельность и любого живого организма, источником информации для которого является окружающий его материальный мир, а каналами, по которым поступает информация, — органы чувств. Вся воспринимаемая организмом информация в той или иной степени фиксируется, накапливается организмом и, в частности, его нервной системой, и сохраняется, запоминается на более или менее длительное время. Наконец, определенное количество информации, связанное с важнейшими функциями живых организмов, их поведением и приспособляемостью к условиям среды, передается потомству.

Механизм накопления, сохранения и передачи по наследству информации в живых организмах, выработанный на протяжении многих миллионов лет эволюционного развития, весьма совершенен, гибок и экономичен. Достаточно сказать, что запоминающая способность (информационная емкость) человеческого мозга измеряется миллиардами двоичных единиц (бит) при весьма малом объеме и ничтожно малой затрате энергии порядка единиц ватт. К сожалению, этот весьма совершенный механизм памяти, который мог бы служить инженерам прообразом для создания технических средств запоминания, в значительной части еще не раскрыт наукой.

Однако некоторые показатели органов нервной системы, как устройств хранения информации, далеки от совершенства. Так, зафиксированную в них информацию со временем оказывается невозможным воспроизвести — человек постепенно забывает запомненное. Поэтому уже первобытный человек пользовался такими

примитивными вспомогательными средствами памяти, как, например, надламывание веток или складывание камней для запоминания пути и места, зарубки для запоминания дней и т. д. Однако наибольшее распространение получил самый удобный — графический способ хранения и передачи информации. Он ведет свое начало от наскальных рисунков (петроглифов) через иероглифы к современным буквенно-звуковым алфавитам.

Рисунок и различные виды графического письма, получившие широкое развитие и распространение уже в глубокой древности (за несколько тысячелетий до нашей эры), являлись до недавнего времени почти единственными и весьма эффективными способами длительного, в течение сотен и тысяч лет, хранения разнообразной информации. Эти средства позволили преодолеть еще один недостаток памяти человека — ограниченность ее объема. В самом деле, как ни велика запоминающая емкость мозга человека, она становится недостаточной по мере расширения сведений об окружающем мире, о последовательности и характере различных событий и т. д. До появления письменности вся такая информация передавалась главным образом изустно от поколения к поколению и, естественно, при этом в значительной степени терялась и подвергалась большим искажениям.

Рисунки и письменные документы позволили человечеству накапливать и надежно сохранять все бо́льшее количество разнообразнейшей информации. Развитие всей науки и культуры неразрывно связано в настоящее время с письменными документами, в которых концентрируются накапливаемые человеком знания. Важнейшим этапом в этой области явилось изобретение в IX в. в Китае книгопечатания, которое в XV—XVI вв. возникло и получило широкое распространение в Европе. За истекший исторический период техника книгопечатания претерпела огромные изменения — от деревянных и металлических гравированных досок и первых «подвижных» литер до современных линотипов, автоматических наборных машин и быстроходных ротационных машин. Стремительное и все убыстряющееся развитие науки и техники за последнее столетие, а также усовершенствование техники книгопечатания привели к огромному росту тиражей книг, газет и журналов, т. е. потоков информации, зафиксированной способами книгопечатания. Даже относительно небольшие библиотеки вмещают уже сейчас количество информации, превышающее возможности запоминания человеком, а продолжающие возрастать потоки печатной информации все настоятельнее ставят на повестку дня вопрос о способах значительно более экономичного ее сохранения при меньших геометрических размерах хранилищ. Так возникло микрофильмирование, т. е. изготовление на фотографической пленке сильно уменьшенных копий с оригиналов рукописей, книг, чертежей и т. д.

Изобретение фотографии датируется 1839 г., когда французский художник Л. Дагер предложил способ фотографирования,

известный под названием дагерротипии. Последовавшее затем развитие фотографической техники завершилось в конце прошлого века изобретением братьями Люмьерами кинематографии (динамической фотографии), получившей в наши дни широчайшее распространение.

Все перечисленные средства накопления информации предназначаются для записи и последующего воспроизведения информации в визуальной форме.

Вторым направлением развития устройств для накопления информации, получившим широкое распространение в течение последних восьмидесяти лет, является запись информации в звуковой форме. Сюда относится механическая запись (фонограф, граммофон), фотографическая и, наконец, магнитная звукозапись. За последние годы все более широкое применение начинает получать и магнитная запись изображений, осуществляемая с помощью специально сконструированных видеомагнитофонов.

Еще в средние века появились первые механические устройства, предназначенные для запоминания определенной программы и управления последующим ее воспроизведением. К таким устройствам относятся, например, программные цилиндры часовых курантов.

Широкое распространение в XVIII—XIX вв. получили музыкальные шкатулки и ящики. Сердцем этих инструментов являлись программные валики со штифтами или перфорированные металлические диски, причем расположение штифтов или отверстий представляет собой своеобразную нотную запись, непосредственно воздействующую на кончики диатонически настроенных язычков, воспроизводящих мелодию. Тот же принцип применяется и в шарманке — механическом духовом музыкальном инструменте, представляющем собой небольшой переносный орга́н с программным управлением.

В 1741 г. французский механик Ж. Вокансон создал первый в мире ткацкий станок с программным управлением, в котором был применен перфорированный барабан, производивший автоматический отбор игл, связанных с нитями основы, для образования заданного узора. В 1804 г. Ж. Жаккар заменил металлический барабан Вокансона перфорированным картоном, также играющим роль программного устройства для получения тканей с нужным рисунком.

В 1824 г. перфорационный принцип для ввода чисел и управления последовательностью операций был впервые применен в разработанной англичанином Ч. Бэббиджем автоматической счетной машине, оперировавшей с перфокартами.

На новой технической основе перфокарты были применены в США в 1887 г. Г. Голлеритом в табуляторе, предназначенном для обработки статистических данных. С тех пор счетно-перфорационные машины стали быстро совершенствоваться, и в настоящее время они получили широчайшее распространение во всем мире.

С середины прошлого века начали применяться как носители информации перфорированные ленты, использование которых связано было с развитием системы кодирования информации в технике связи.

В 1858 г. англичанин Ч. Уитстон изобрел автоматический телеграфный аппарат, в котором применен принцип предварительной заготовки на перфораторе ленты с отверстиями, соответствующими коду Морзе, и автоматической передачи информации с перфорированной ленты в линию трансмиттером. Тот же принцип использован и в телеграфном аппарате Крида.

В 1872—1876 гг. французский механик Э. Бодо сконструировал буквопечатающий аппарат с пятизначным кодом, причем для переприема в этом аппарате, как и в ряде последующих систем, нашла применение пятидорожечная перфорированная лента, использованная позднее и для ввода информации в вычислительные машины.

Если добавить к перечисленным средствам хранения информации электромеханические и электронные реле (триггеры) на вакуумных лампах, обладающие двумя устойчивыми состояниями и, следовательно, принципиально пригодные для запоминания двоичных цифр, то этим и будет в основном исчерпан перечень устройств хранения информации, имевшихся в распоряжении инженеров к середине 40-х годов, когда началась работа по конструированию быстродействующих цифровых вычислительных машин (ЦВМ). Поэтому в первых образцах вычислительных машин приходилось использовать весьма ограниченный ассортимент запоминающих устройств (ЗУ), доставшийся в наследство от техники связи, звукозаписи, кинематографии и автоматики и включавший в себя перфокарты, перфоленты, кинопленку, магнитную ленту, электромеханические и электронные реле. Так, в одной из первых электронных ЦВМ «ЭНИАК» использовалось ЗУ на электронноламповых триггерах емкостью 20 десятиразрядных чисел.

Однако перечисленные виды ЗУ не обеспечивали необходимого быстродействия, сравнимого с быстродействием электронных арифметических устройств машины. Правда, на электронных реле (триггерах) можно было создать весьма быстродействующие ЗУ, но при достаточно большой емкости порядка десятков или сотен многоразрядных чисел такие устройства оказывались очень громоздкими и неэкономичными. Поэтому дальнейшие усилия в этой области были направлены на разработку так называемых оперативных ЗУ достаточной емкости, которые при небольших размерах и расходе энергии позволили бы осуществлять запись и считывание с достаточно большой скоростью, сопоставимой со скоростью работы других блоков электронной ЦВМ.

В первых быстродействующих машинах, изготовленных в конце 40-х и начале 50-х годов, для этой цели применялись ртутные линии задержки, на которых строились так называемые динамические ЗУ рециркуляционного типа. В дальнейшем были созданы

динамические ЗУ на более удобных в конструктивном отношении и в эксплуатации твердых линиях задержки с пьезоэлектрическими и магнитострикционными преобразователями.

В 1948—1954 гг. в США и Англии было предложено большое количество различных типов электроннолучевых трубок, предназначенных для хранения информации (потенциалоскоп, трубка с барьерной сеткой, трубка с поддерживающим облучением, селектрон), и почти все большие быстродействующие машины, изготовлявшиеся в первой половине 50-х годов, имели оперативные ЗУ электроннолучевого типа.

Однако уже в 1951—1952 гг. в США были сконструированы первые образцы ЗУ на магнитных сердечниках с прямоугольной петлей гистерезиса. Первое действующее ЗУ такого типа было применено в 1953 г. вместо ЗУ на электроннолучевых трубках в машине «Вихрь» Массачусетского технологического института, а с 1954—1955 гг. началось бурное внедрение ЗУ на магнитных сердечниках как в вычислительную технику, так и в различные области автоматики и телемеханики. За последние годы разработаны многочисленные разновидности магнитных ЗУ на многоотверстных ферритовых пластинах, на сердечниках со сложным магнитопроводом, тонких ферромагнитных пленках и др. Благодаря своему быстродействию, экономичности, малым габаритам и надежности магнитные ЗУ заняли ведущее место среди других видов таких устройств. Можно предсказать, что в течение ближайших 5—7 лет, а может быть и долее, ЗУ на ферритовых сердечниках сохранят главенствующую роль в технике оперативных ЗУ.

В течение последних двух десятилетий параллельно перечисленным разработкам, кроме развития уже применявшихся ЗУ, создавались различные их типы, основанные на новых физических принципах.

В дополнение к ЗУ с магнитной записью на ленточных носителях широкое распространение получили устройства на магнитных барабанах, а в последнее время все шире применяются ЗУ на магнитных дисках.

Разработаны ЗУ фотоскопического типа с записью информации на кинопленке, пластинках и дисках, покрытых фотоэмульсией.

В настоящее время созданы образцы малогабаритных и весьма экономичных ЗУ на ферроэлектриках и криогенных запоминающих элементах, работающих в условиях глубокого охлаждения.

Очень высокое быстродействие можно получить в ЗУ на современных полупроводниковых приборах (транзисторах и туннельных диодах). Особенно перспективно применение таких ЗУ в качестве сверхоперативной памяти в виде различных интегральных схем, и в частности, на металлооксидных транзисторах (МОП-транзисторы).

Предпринимаются попытки использования для хранения информации таких явлений, как голография, фотохромизм (изменение цвета некоторых веществ под влиянием облучения их светом

с различными длинами волн), радиационное намагничивание, параметрическое возбуждение колебательных систем, ядерный резонанс и др. Исследуются возможности создания ЗУ с использованием свойств высокомолекулярных соединений. Делается попытка применения для записи и считывания информации новейшей лазерной техники. Наконец, ведутся поисковые работы в области создания ЗУ на бионических принципах.

Не вызывает сомнения, что уже в ближайшие десятилетия будут созданы устройства хранения информации, которые по своей емкости будут приближаться к мозгу живых организмов, а по надежности и быстродействию — значительно превосходить его.

1-2. Применение устройств хранения дискретной информации

Основанные на разнообразных физических принципах устройства, предназначенные для хранения дискретной информации, находят все более и более широкое применение в различных отраслях современной науки и техники. При этом устройства хранения получают и самые разнообразные наименования. Их называют накопителями информации, накопительными блоками, блоками памяти, запоминающими устройствами и т. д.

Специальные накопители сигнала являются неотъемлемыми элементами новейших систем связи с повышенной помехоустойчивостью, основанных на методе накопления и корреляционном методе приема. Вообще при передаче любого кода (в телеграфной связи, в технике телеуправления, телеизмерений и т. д.) расшифровка кода обычно начинается после накопления (запоминания) всего кода или некоторой его части, что также требует наличия специальных ЗУ.

ЗУ находят широкое применение в автоматической телефонии. Так, в схемах автоматических телефонных станций обычно используется регистр — ЗУ, фиксирующее набранный абонентом номер и затем выдающее этот номер, т. е. информацию о вызываемом абоненте, исполнительным механизмам в первоначальном виде или в виде, пересчитанном в другую систему счисления.

Еще более возрастает роль ЗУ в электронных автоматических телефонных станциях. Так, например, для экспериментальной АТС фирмы Эриксон «ЕМАХ» разработаны специальные запоминающие электронные лампы, в которых используется эффект вторичной электронной эмиссии. Эти лампы, имеющие по двадцати одинаковых и независимых друг от друга электродов, могут накапливать до 20 *бит* информации. В АТС DIAD (США) применен метод накопления и распределения информации с помощью магнитного барабана. Еще в 1957 г. в Англии пущена в опытную эксплуатацию АТС с электронным управлением и ЗУ на магнитном барабане. В этой станции происходит «прием заказов» на соединение с занятыми абонентами. Эти заказы фиксируются в ЗУ, и после освобо-

ждения требуемых абонентов соединение с ними осуществляется автоматически, без повторного набора.

В некоторых отечественных и зарубежных автоматизированных системах междугородной связи используются релейные, магнитные или электронные накопители вызовов. Они принимают на себя вызов и запоминают его, если все каналы связи требуемого направления заняты. После освобождения канала накопитель вызовов подключает его к очередному вызывавшему абоненту, вызывает его и одновременно посылает по каналу вызов требуемому абоненту в другом городе.

Важная роль отводится ЗУ в различных устройствах и системах, где накопители информации предназначаются для хранения в течение более или менее длительного времени заранее подготовленных приказов (программ работы) и передачи их в нужный момент времени исполнительным органам для реализации.

Все более широкое распространение получают металлообрабатывающие станки и другие агрегаты с программным управлением с записью программ на перфокартах, перфоленте, магнитной ленте и других носителях информации.

ЗУ являются также важнейшими элементами систем, предназначенных для автоматического управления различными видами транспорта, например, впервые в мире разработанный в нашей стране «автомашинист», предназначенный для вождения железнодорожных поездов без машиниста; машины, пилотирующие самолеты без летчика («автопилоты»); управляющие системы метеорологических, баллистических, космических ракет, кораблей и т. д.

В радиолокационных системах, как правило, применяются линии задержки, выполняющие роль устройств памяти, запоминающих информацию на короткие промежутки времени. В так называемых системах индикации движущихся целей применение накопительных элементов позволяет запоминать данные измерения расстояний до объекта и азимутов при последовательных посылках зондирующих импульсов, сравнивать эти данные между собой и, таким образом, выделять подвижные объекты и определять скорость и направление их движения.

Все чаще используются ЗУ и для автоматической регистрации результатов научного эксперимента [1-26]. Для счета частиц широко применяются счетчики импульсов и пересчетные схемы, представляющие собой относительно простые устройства, накапливающие и хранящие информацию в дискретной форме. В многоканальных амплитудных и временны́х анализаторах для сортировки по каналам применяются ЗУ на диодных матрицах, ферритовых сердечниках, электроннолучевых трубках и др. Применяя ЗУ, можно создать устройства для осуществления регистрации количества частиц за очень короткие промежутки времени, недоступные для непосредственного наблюдения оператором.

Широко используются различные ЗУ для автоматической регистрации данных, передаваемых по каналам телеизмерений,

а также на приемном конце этих каналов. Это особенно важно в тех случаях, когда измерения должны проводиться без участия человека, как, например, при некоторых геофизических исследованиях, при исследованиях атмосферы и космического пространства с помощью ракет и искусственных спутников Земли, при счете космических частиц, метеоритов и других исследованиях.

В связи с быстрым ростом количества издаваемой литературы, патентов и других публикаций, их хранение и поиск при современной организации библиотечного дела все более и более осложняется. Эта проблема может быть решена созданием специальных информаториев — хранилищ информации, оснащенных компактными ЗУ, в которых может осуществляться автоматическая запись информации, автоматический ее поиск по запросам абонентов (в том числе дистанционным), выдача информации в звуковой или визуальной форме, например, на экране абонентских телевизоров.

Уже этот беглый и далеко не полный перечень областей применения ЗУ свидетельствует о весьма существенной роли, которую они играют в современной науке и технике. Однако особенно важное, можно сказать, решающее значение имеют устройства хранения дискретной информации в современной вычислительной технике, где они являются важнейшей составной частью быстродействующих ЦВМ.

1-3. Основные физические и структурные принципы построения запоминающих устройств

В современной цифровой вычислительной технике практически повсеместное распространение получило кодирование информации в двоичной системе счисления. Даже в тех случаях, когда машины обрабатывают информацию, закодированную в других системах счисления, для записи чисел могут использоваться только два символа «0» и «1», как, например, в двоично-десятичной системе.

Это позволяет применять для хранения всей цифровой информации наиболее простые и надежные элементы с двумя устойчивыми состояниями (бистабильные элементы), такие, как триггеры, ферритовые сердечники, конденсаторы и др. Для хранения каждого двоичного разряда необходим отдельный бистабильный запоминающий элемент. Такой запоминающий элемент должен допускать простое управление его состоянием (запись информации), длительное хранение измененного под внешним воздействием состояния (хранение информации), возможность распознавания того, в каком состоянии элемент находится (считывание информации) и, если предполагается многократное использование элемента, возможность возвращения его в некоторое начальное состояние (стирание информации).

Для осуществления всех перечисленных манипуляций запоминающий элемент должен связываться с внешней средой по крайней мере двумя каналами: входным и выходным. На вход элемента по-

ступают сигналы записи или стирания информации, а также сигналы опроса состояния элемента. С выхода элемента снимаются сигналы считывания, указывающие, в каком состоянии он находится, т. е. какая информация в нем записана. Если под влиянием сигнала опроса состояние запоминающего элемента существенно изменится, то происходит так называемое разрушающее считывание. Если же после считывания информации состояние элемента не изменится, то осуществляется так называемое неразрушающее считывание.

Очень важной проблемой синтеза ЗУ является разработка такой структуры, при которой можно было бы свести к минимуму число соединений их с внешними по отношению к ЗУ устройствами. В самом деле, при емкости ЗУ порядка тысяч или десятков тысяч многоразрядных чисел, они содержат сотни тысяч и миллионы отдельных запоминающих элементов. Если каждый элемент, как это было только что показано, имеет по крайней мере два зажима, то если бы от всех элементов делались автономные выводы, общее количество их у ЗУ достигало бы сотен тысяч и миллионов. Это, конечно, было бы совершенно неприемлемо с конструктивной и схемной точек зрения, особенно учитывая необходимость коммутации этих выводов для обращения к заданному запоминающему элементу.

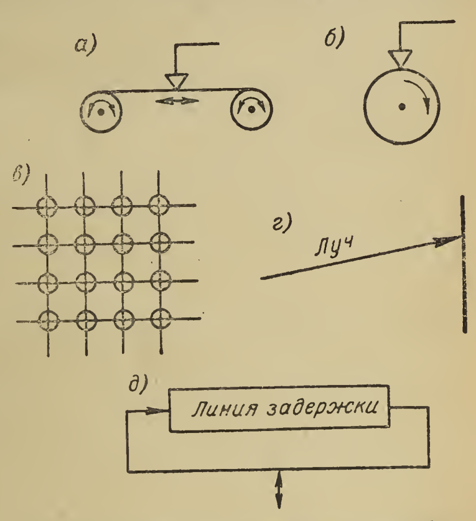


Рис. 1-1. ЗУ с различными способами обращения к нужной ячейке.

Задача минимизации количества выводов решается различными способами, приемлемость которых определяется физическими принципами работы запоминающих элементов и конкретными условиями эксплуатации ЗУ. В зависимости от применяемого в ЗУ способа обращения к заданной группе запоминающих элементов, образующих запоминающую ячейку для записи одного числа, подавляющее число применяемых в настоящее время ЗУ можно отнести к одной из следующих групп (рис. 1-1).

Л е н т о ч н ы е ЗУ (рис. 1-1, *а*), в которых информация записывается на ленточный носитель (перфолента, магнитная лента, кинопленка), который может перемещаться в обе стороны, перематываясь с бобины на бобину. При перемотке ленты к неподвижному устройству записи-считывания (магнитная головка, фото элемент и др.) подается требуемая зона или ячейка ЗУ, в которой должна быть записана или считана информация.

Вращающиеся ЗУ (рис. 1-1, *б*) — магнитные барабаны, магнитные и фотоскопические диски и т. д. Здесь происходит циклическая подача к неподвижному устройству записи-считывания участков носителя информации. Общим недостатком ленточных и вращающихся ЗУ является потребность в механическом приводе и наличие механического движения деталей, что связано с усложнением конструкции, необходимостью смазки, износом деталей и т. д. Однако использование механических перемещений позволяет значительно упрощать схемы поиска нужной ячейки по заданному адресу, что в сочетании с большими плотностями записи на таких носителях, как ферромагнитные и фотографические материалы, обеспечивает широкое распространение как ленточных, так и вращающихся ЗУ.

Матричные ЗУ (рис. 1-1, *в*), в которых запоминающие элементы располагаются в узлах матрицы и нужные ячейки избираются возбуждением соответственных пересекающихся вертикальных и горизонтальных шин матрицы. Эти устройства при большой емкости ЗУ получили весьма широкое распространение благодаря своей компактности и удобству выбора запоминающих ячеек.

Лучевые ЗУ (рис. 1-1, *г*), в которых выбор запоминающих элементов осуществляется при помощи электронного или светового луча. Этот метод позволяет осуществлять весьма быстрый поиск нужных запоминающих элементов. Поэтому наряду с ЗУ на электроннолучевых трубках он применяется также для считывания информации с фотоматериалов, ферромагнитных пленок в других носителей.

Динамические (рециркуляционные) ЗУ с ультраакустическими или электромагнитными линиями задержки (рис. 1-1, *д*). В них информация в виде последовательности электрических импульсов непрерывно циркулирует по замкнутой электрической цепи, и, таким образом, запоминающие ячейки периодически как бы проходят мимо ответвления, связывающего ЗУ с другими цепями.

1-4. Основные параметры запоминающих устройств

Качество ЗУ и целесообразность его применения в той или иной конкретной вычислительной машине или системе определяется рядом параметров, из которых важнейшими являются емкость, быстродействие, надежность, устойчивость работы, трудоемкость изготовления и стоимость, сложность конструкции и технологичность, габариты, вес, экономичность. Рассмотрим более подробно некоторые из перечисленных параметров.

Емкость выражается количеством информации, хранящейся в ЗУ:

$$M = Nn, \qquad (1\text{-}1)$$

где M — емкость в *битах*, N — количество чисел в ЗУ (количество адресов), n — разрядность чисел.

Часто емкость ЗУ указывают в числах (словах) N с указанием количества разрядов в числе n и принятой системы счисления (как правило, двоичной).

В последние годы в американской литературе емкость ЗУ часто указывают в укрупненных единицах информации — *байтах*, причем один байт принимается равным восьми двоичным единицам (*битам*).

Емкостью ЗУ в значительной степени определяются возможности кибернетической системы с точки зрения широты диапазона и сложности задач, которые она может решать. Распределение общей емкости ЗУ между ее сомножителями (количеством адресов и разрядов) в некоторых случаях может оказывать существенное влияние на другие характеристики ЗУ.

Удобным показателем для сравнения различных блоков памяти является удельная емкость μ, выражаемая в битах на единицу физического объема V:

$$\mu = \frac{M}{V} \ [бит/см^3]. \tag{1-2}$$

Б ы с т р о д е й с т в и е ЗУ может быть выражено его временны́ми характеристиками, к которым относятся: время поиска (дешифрации адреса) $t_п$, затрачиваемое на отыскание нужной ячейки ЗУ; время записи $t_з$; время считывания $t_{сч}$; время стирания $t_{стир}$ и время восстановления (регенерации) информации $t_{рег}$, необходимое в тех ЗУ, где считывание сопровождается стиранием информации (разрушающее считывание).

Практически быстродействие ЗУ удобно характеризовать укрупненными временны́ми характеристиками — временем о б р а щ е н и я, которое часто называют также временем в ы б о р к и, и временем п о л н о г о ц и к л а.

Время обращения $t_{обр}$ — это временной интервал от момента посылки в ЗУ адреса требуемой ячейки до момента получения числа на выходе (при считывании)

$$t_{обр} = t_п + t_{сч}. \tag{1-3}$$

Более полно быстродействие ЗУ характеризуется временем цикла $t_ц$, представляющим собой минимальное время между последовательными обращениями к ЗУ,

$$t_ц = t_п + t_{сч} + (t_{рег} \text{ или } t_з) \tag{1-4}$$

и всегда бо́льшим времени обращения

$$t_ц > t_{обр}.$$

Быстродействие можно характеризовать также ч а с т о т о й о б р а щ е н и я к ЗУ

$$F = \frac{1}{t_ц}. \tag{1-5}$$

Время цикла у современных ЗУ заключается в пределах от нескольких минут (внешние накопители на магнитной ленте) до нескольких микросекунд и долей микросекунды (ЗУ на ферритовых сердечниках, многоотверстных пластинах, магнитных пленках). У некоторых сверхоперативных ЗУ (на туннельных диодах, магнитных пленках) это время доведено до нескольких десятков наносекунд.

Обобщенные параметры. Увеличение емкости ЗУ приводит к снижению его быстродействия, так как увеличивается время поиска объектов информации в большом массиве, время пробега импульсов в более длинных проводах и т. д. Следовательно, оказывается, что два важнейших требования к основным параметрам ЗУ — увеличение емкости и повышение быстродействия — являются взаимно противоречивыми и в зависимости от конкретных обстоятельств приходится поступаться тем или иным из этих показателей в поисках оптимального компромисса. При проектировании машины емкость и быстродействие задаются обычно как раздельные величины. Однако, сравнивая два или более ЗУ одинаковой емкости, но различного быстродействия, можно считать, что ЗУ с бо́льшим быстродействием обладает бо́льшими потенциальными возможностями. То же можно сказать и о ЗУ равного быстродействия, обладающем большей емкостью.

Поэтому для сравнения ЗУ целесообразно ввести понятие информационной мощности:

$$W = MF. \quad (1\text{-}6)$$

Однако этот критерий не учитывает таких существенных показателей, как физический объем V, вес G и потребляемая мощность P, особенно важных при работе ЗУ в вычислительных устройствах различных подвижных объектов. Эти факторы учитывает другая характеристика — добротность ЗУ:

$$Q = \frac{W}{VGP} = \frac{MF}{VGP}. \quad (1\text{-}7)$$

Надежность ЗУ, как вообще любого устройства, количественно определяется вероятностью сохранения основных параметров в заданных пределах в течение заданного промежутка времени. При этом нужно учитывать как собственно отказы элементов ЗУ, обусловленные внезапным или постепенным выходом их параметров за заданные пределы, так и область устойчивой работы ЗУ при отклонении величин управляющих сигналов, температуры окружающей среды, внутренних и внешних помех и других внешних воздействий.

1-5. Классификация запоминающих устройств

Классифицировать ЗУ можно по различным признакам — по их назначению в цифровой машине, по схемно-конструктивным признакам, по физико-химическим принципам действия запоми-

нающих элементов. Назначение различных блоков памяти в ЦВМ будет подробно рассмотрено в гл. 2. Некоторые наиболее распространенные схемно-конструктивные решения, обеспечивающие доступ к нужной ячейке ЗУ, изображены на рис. 1-1 и описаны выше. Исключительное разнообразие физико-химических явлений, лежащих в основе действия запоминающих элементов (механиче-

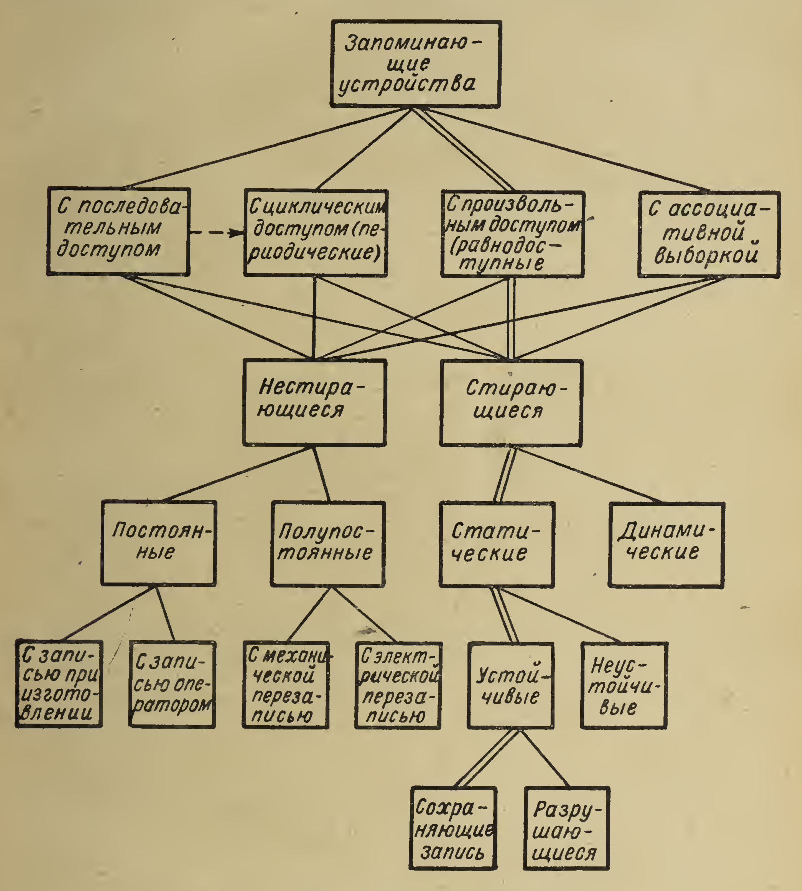


Рис. 1-2. Схема классификации ЗУ.

ская целостность носителя информации, электромагнитные, ферромагнитные, сегнетоэлектрические, ультразвуковые, криогенные, электронные и другие явления), делают весьма затруднительной и малоэффективной классификацию ЗУ по этому признаку.

С точки зрения особенностей функционирования все ЗУ можно классифицировать в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1-2.

По признаку последовательности обращения к нужной числовой ячейке обычные адресные ЗУ разделяются на три группы.

ЗУ с последовательным доступом, в которых обращение к заданной ячейке требует как бы последовательного прохождения мимо других ячеек (например, в ЗУ на магнитной ленте в процессе поиска при перемотке ленты мимо записывающе-считывающей головки проходят другие последовательно расположенные ячейки).

ЗУ с циклическим доступом (периодического типа), которые могут рассматриваться как модификация устройств с последовательным доступом. В этих ЗУ, независимо от потребности обращения к той или иной ячейке, информация, содержащаяся в ней, периодически появляется под записывающе-считывающими элементами и, следовательно, может быть прочитана в определенные моменты, разделенные интервалом времени, который называется циклом работы ЗУ. Типичными примерами таких устройств являются ЗУ на магнитном барабане или дисках и на линии задержки.

ЗУ с произвольным доступом, или равнодоступные, в которых обращение к любой ячейке осуществляется независимо от ее расположения среди других ячеек (в накопительном поле). При этом время поиска определяется в основном быстродействием коммутационных схем, обеспечивающих выбор заданной ячейки. Типичный пример устройств этого типа — матричные ЗУ на ферритовых сердечниках.

Особняком стоят так называемые ассоциативные ЗУ, в которых поиск информации осуществляется не по адресу, а по признакам самой информации, причем, как правило, происходит одновременный просмотр всех запоминающих ячеек или определенной группы ячеек.

Подробнее методы поиска информации в ЗУ будут рассмотрены в гл. 2.

В зависимости от кратности записи информации ЗУ делятся на нестирающиеся и стирающиеся (точнее с нестирающейся и со стирающейся записью).

Нестирающиеся ЗУ допускают лишь однократную запись информации на носителе и последующее многократное ее считывание. При этом запись информации может осуществляться либо при изготовлении ЗУ (например, распайка диодов в соответствующих узлах диодной матрицы при изготовлении ее на заводе), либо оператором или автоматически на подготовленном заранее носителе (например, пробивка отверстий с помощью перфоратора в бумажных лентах или картах). Принцип нестирающейся записи информации находит применение при создании так называемых постоянных ЗУ, предназначенных для хранения в машинах неизменяемой информации — постоянных программ, коэффициентов, справочных данных.

Различают также *полупостоянные* ЗУ, в которых однажды записанная информация хотя и используется многократно, причем иногда и в течение длительного времени, но при необходимости может быть заменена либо механическим, либо электрическим путем (*полупостоянные ЗУ с механической или электрической перезаписью*).

Стирающиеся ЗУ допускают многократную запись, считывание, стирание, новую запись информации и т. д. В одних случаях использование таких ЗУ практически не ограничено во времени (например, ЗУ на ферритовых сердечниках), в других случаях оно ограничивается естественным износом носителя информации (ЗУ на магнитной ленте).

Стирающиеся ЗУ можно подразделить на *статические* и *динамические* (все нестирающиеся ЗУ — статические).

Статическими ЗУ называют такие, в которых физический код информации (импульсы, распределение магнитных или электрических состояний и т. д.) остается неподвижным относительно носителя информации в течение всего времени хранения. К ним относятся ЗУ с поверхностной магнитной записью, на ферритовых сердечниках, триггерах, электроннолучевых трубках.

В динамических ЗУ информация, закодированная в виде последовательностей электрических импульсов, находится в непрерывном движении относительно носителя. Основным и практически единственным типом применяемых в настоящее время динамических ЗУ являются устройства на линиях задержки. В этих ЗУ код информации циркулирует по замкнутому тракту, причем запись и считывание могут осуществляться в строго определенные моменты времени, когда импульсы кода нужного числа проходят мимо соответствующего ответвления от замкнутого контура циркуляции информации.

Статические ЗУ можно разделить на *устойчивые*, в которых информация в условиях нормальной эксплуатации сохраняется неограниченно долго (ЗУ на триггерах, ферритовых сердечниках), и *неустойчивые*, в которых может иметь место самопроизвольное стирание информации, как, например, в конденсаторных ЗУ, из-за утечки или в запоминающих электроннолучевых трубках из-за растекания или «забрызгивания» зарядов. Поэтому для длительного хранения информации в неустойчивых ЗУ необходимо ее периодическое восстановление (например, подновление потенциального рельефа на экранах электроннолучевых трубок).

В свою очередь, устойчивые ЗУ, в зависимости от того, сохраняют ли они зафиксированную информацию при выключении питания, можно разделить на *сохраняющие* запись (например, ферромагнитные ЗУ) и *разрушающиеся*, в которых прекращение питания вызывает разрушение информации (например, ЗУ на триггерах, динамические ЗУ на линиях задержки).

Следует подчеркнуть, что все динамические ЗУ относятся к группе неустойчивых и разрушающихся. Разрушающимися, естественно, являются и все неустойчивые ЗУ.

Наиболее гибкими и совершенными по своим возможностям являются ЗУ с произвольным доступом, стирающиеся, статические, устойчивые, сохраняющие запись (на схеме классификации ЗУ их цепь выделена двойными линиями связей). Однако условия эксплуатации, технико-экономические, конструктивные и другие соображения могут сделать более целесообразным применение в тех или иных конкретных условиях и других типов ЗУ.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОРГАНИЗАЦИЯ ПАМЯТИ В ЦВМ И МЕТОДЫ ВЫБОРКИ ИНФОРМАЦИИ В ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

2-1. Организация памяти в электронных ЦВМ

Рассмотрим упрощенную блок-схему ЦВМ (рис. 2-1) с целью выяснения роли, которую играют ЗУ в процессе решения задачи машиной. Задача, т. е. исходные данные и программа действий над ними, вводится в машину через устройство ввода и поступает на хранение в ЗУ.

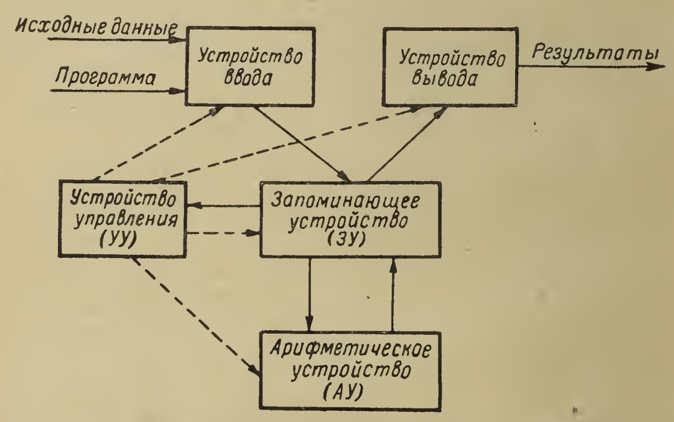


Рис. 2-1. Упрощенная блок-схема цифровой вычислительной машины.

Выполнение операций над числами, предусмотренных программой, осуществляется арифметическим устройством, в которое перед операцией поступают из ЗУ участвующие в операции числа, а после выполнения операции ее результаты из арифметического устройства отправляются в ЗУ и фиксируются там до того момента, когда они вновь потребуются на определенном этапе решения задачи.

Наконец, управление выполнением операций в соответствии с заданной программой осуществляется в машине устройством управления. Для этого в устройство управления перед выполнением каждой операции из ЗУ поступает определенным образом закодированная команда, которой определяются действия машины в процессе выполнения данной операции. В этой команде обычно содержится указание, какие действия должны происходить в арифметическом устройстве, и один или несколько адресов (в зависимости от принятой системы команд) ячеек ЗУ, из которых должны извлекаться (считываться) участвующие в операции числа и куда должны помещаться (записываться) числа, полученные в результате выполнения операции.

Все цепи управления на рис. 2-1 показаны пунктирными линиями, а цепи передачи информации (чисел и команд) — сплошными линиями.

Окончательные и представляющие существенный интерес промежуточные результаты решения задачи из ЗУ выдаются машиной через устройство вывода.

Из сказанного ясно, что выполнение каждой операции машиной неизбежно связано с одним или даже несколькими обращениями к ее ЗУ, т. е. со считыванием зафиксированной в ЗУ информации и с записью в ЗУ новой информации. Поэтому, естественно, что если даже применить в других блоках (в частности в арифметическом устройстве) весьма быстродействующие элементы, нельзя будет добиться большой скорости всей машины, если запись, считывание и поиск информации в ЗУ будут происходить недостаточно быстро.

Однако не следует полагать, что в одном блоке ЗУ сосредоточены все устройства хранения информации. Вообще каждый из блоков, в котором происходит какая бы то ни было обработка информации, должен содержать устройства для хранения информации в течение времени, необходимого для ее обработки. Поэтому и во всех остальных блоках машины: устройствах ввода и вывода, арифметическом и управляющем устройствах и в некоторых не показанных на блок-схеме устройствах, содержатся те или иные ЗУ, чаще всего в виде малоемких регистров, предназначенных для хранения одного или нескольких чисел и команд. Общее количество информации, необходимое для решения сложных задач, достигает десятков — сотен миллионов слов, а время обращения к ЗУ, во избежание замедления работы арифметического устройства машины, не должно превышать нескольких микросекунд или даже долей микросекунды. Эти требования большой емкости и высокого быстродействия ЗУ являются противоречивыми и практически, по крайней мере в настоящее время, не могут быть осуществлены в одном устройстве. Наиболее реальный путь преодоления этого противоречия заключается в использовании в ЦВМ нескольких ЗУ разного уровня по быстродействию и емкости.

В самых простых случаях вся память машины распределяется в двух уровнях.

Для хранения больших массивов информации предназначается внешнее ЗУ, которое иногда называют также накопителем. В нем используются, как правило, устройства с магнитной записью: магнитные ленты, барабаны и диски, на которых за счет применения параллельно работающих блоков можно осуществлять хранение практически неограниченных объемов информации. Однако обращение к таким ЗУ требует времени порядка нескольких секунд — десятков секунд или даже нескольких минут, как в ЗУ на магнитной ленте.

Для хранения информации, непосредственно участвующей в процессе выполнения операций, осуществляемых арифметическим устройством, предназначается оперативное ЗУ или, как его иногда называют, оперативная память. Оно строится в настоящее время обычно на ферритовых сердечниках или других быстродействующих ферромагнитных запоминающих элементах (тонких магнитных пленках, многоотверстных ферритовых пластинах, магнитной проволоке и т. д.). Емкость оперативного ЗУ обычно не превышает нескольких тысяч или десятков тысяч слов. Лишь в отдельных, наиболее совершенных ЦВМ, она достигает сотен тысяч слов. Время обращения к оперативному ЗУ современных машин составляет несколько микросекунд. В наиболее быстродействующих ЦВМ это время снижено до 1—2 *мксек*, а в лучших уникальных образцах машин составляет доли микросекунды.

В процессе решения задачи обращения осуществляются в основном к оперативному ЗУ. Однако при этом информация ограниченного объема, хранящаяся в оперативном ЗУ, постепенно используется, и после окончания некоторого этапа вычислений возникает необходимость использования новой группы исходных данных или нового участка программы, либо вывода некоторой группы полученных результатов. Для этого оказывается необходимым произвести обмен информацией между внешним и оперативным ЗУ.

Так как запись или считывание информации во внешних ЗУ отдельными словами оказываются невыгодными с точки зрения затрат времени (время поиска нужной ячейки несоизмеримо велико по сравнению с временем считывания или записи), то обмен между внешним и оперативным ЗУ носит обычно групповой характер (информация передается в виде групп слов). Это позволяет значительно сократить среднее время обмена, отнесенное к одному слову.

Для повышения эффективности обмена информацией между устройствами ЦВМ, работающими с разными скоростями, и промежуточного хранения информации при обмене в составе ЦВМ могут находиться специальные ЗУ, получившие название буферных. Буферные ЗУ служат как бы редуктором, согласо-

вывающим работающие с различными скоростями внешние и внутренние ЗУ. Буферные ЗУ занимают промежуточное место и по емкости и по быстродействию.

Как показывает анализ использования ЗУ, часть хранящейся в нем информации используется относительно редко. В то же время в среднем к 10% ячеек памяти в процессе работы машины осуществляются весьма частые обращения. Это навело на мысль сделать небольшую часть оперативного ЗУ значительно более быстродействующей и помещать в него ту часть информации, с которой осуществляются многократные обращения. Совокупность этих ячеек получила название с в е р х о п е р а т и в н о г о ЗУ; оно позволяет значительно ускорить работу машины за счет уменьшения среднего времени цикла обращения к ЗУ. Сверхоперативные ЗУ могут создаваться на тонких магнитных пленках, туннельных диодах, микроминиатюрных сердечниках, транзисторных триггерах и других запоминающих элементах, обеспечивающих в несколько раз более высокое быстродействие, чем запоминающие элементы основной части оперативного ЗУ. Сверхоперативные ЗУ в настоящее время имеются лишь в немногих наиболее быстродействующих машинах.

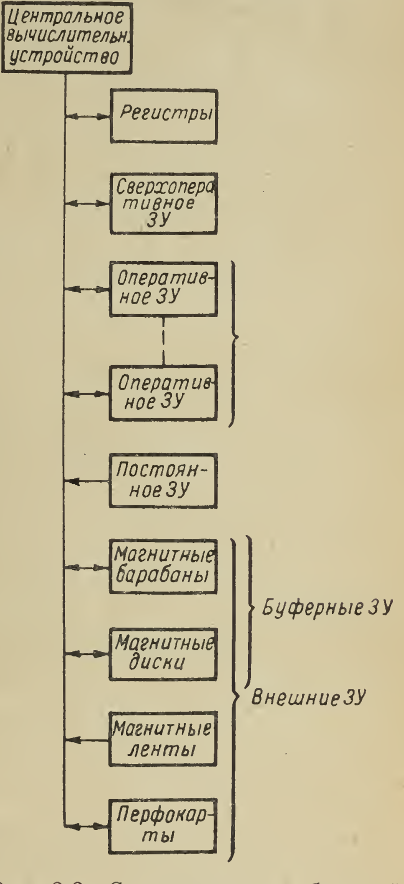


Рис. 2-2. Система памяти большой ЦВМ.

Кроме информации, которая необходима для решения на ЦВМ данной конкретной задачи, существует информация, необходимая для решения самых разнообразных задач. Сюда относятся различные коэффициенты, табличные данные, стандартные подпрограммы для перевода вводимых в машину чисел из двоично-десятичной системы счисления в двоичную и обратного перевода при выводе из машины результатов решения, для вычисления логарифмов, тригонометрических функций и т. д.

Для записи такой неизменной информации применяются так называемые п о с т о я н н ы е ЗУ, которые называются также

односторонними, долговременными или пассивными ЗУ. Из постоянного ЗУ машина может производить только считывание информации, а изменение информации в них производится извне. В одних случаях запись информации в постоянных ЗУ осуществляется при изготовлении самого ЗУ (соответствующая прошивка сердечников или распайка диодов в диодной матрице). Такие ЗУ могут быть названы фиксированными. В других случаях изменение информации в постоянных ЗУ может быть осуществлено оператором извне, перед решением задачи, путем, например, перемещения ферритовых стержней или смены перфокарт. Такие ЗУ часто называют полупостоянными ЗУ с механической перезаписью. Наконец существуют полупостоянные ЗУ с электрической перезаписью, которые, как правило, в процессе решения задачи работают также только в режиме считывания, но информация в них может быть изменена либо оператором извне, либо по особой команде в процессе решения задачи, либо автоматически в зависимости от тех или иных результатов решения или под воздействием поступающей информации. Последний способ смены информации ЗУ может использоваться, например, в самоорганизующихся вычислительных системах для изменения некоторой постоянной программы обработки информации. Полупостоянные ЗУ с электрической перезаписью строятся в настоящее время, как правило, на ферромагнитных запоминающих элементах с неразрушающим считыванием (биаксах, трансфлюксорах, элементах с модуляцией магнитного сопротивления (ММС) и др.).

Из сказанного ясно, что в современной большой машине хранение информации осуществляется в ЗУ нескольких уровней, образующих как бы пирамиду (рис. 2-2), в основании которой находится внешнее ЗУ большой емкости и относительно низкого быстродействия, затем следуют буферное, оперативное и сверхоперативное ЗУ, и вершину пирамиды образуют числовые регистры, входящие в состав арифметического устройства и устройства управления.

2-2. Распределение памяти и обмен информацией между запоминающими устройствами различных уровней

Наличие в машине ЗУ нескольких уровней выдвигает важную задачу оптимальной организации всего комплекса ЗУ и, особенно, рационального распределения информации в памяти и организации обмена информации в ЗУ в процессе работы ЦВМ.

Размещение информации в ЗУ разного уровня носит название распределения памяти. Обычно распределением памяти занимается программист при анализе задачи и составлении программы, т. е. до начала решения задачи. Такое распределение памяти называют статическим. При этом широко используется программная организация обмена между ЗУ разного уров-

ня, когда обмен происходит под воздействием специальных команд, содержащихся в программе. Однако это существенно затрудняет работу программиста, который в процессе программирования должен все время помнить, где на данном этапе находится нужная информация, какие из запоминающих ячеек заняты, а какие свободны и т. д.

Кроме того, программная организация обмена между ЗУ обладает существенными недостатками при работе в режиме мультипрограммирования, обеспечивающего одновременное решение на ЦВМ нескольких задач. Мультипрограммирование существенно повышает эффективность использования высокопроизводительных машин. Например, если при исполнении некоторой программы возникает задержка из-за того, что в оперативном ЗУ в данный момент отсутствует необходимая информация, то на время, пока эта информация будет переписываться в оперативное ЗУ из внешнего ЗУ, арифметическое устройство может быть использовано для исполнения другой программы и т. д.

Мультипрограммирование не должно порождать каких-либо новых трудностей при решении задач или усложнять работу обслуживающего персонала и, в первую очередь, программистов. Для этого при мультипрограммировании должна сохраняться возможность совершенно автономного написания и автоматического составления программ независимо от их дальнейшего совместного исполнения в машине. Все составленные программы записываются во внешнем ЗУ машины и затем в различных сочетаниях вводятся в оперативное ЗУ, ячейки которого должны быть некоторым образом распределены между этими программами и относящейся к ним исходной информацией. Однако ни распределение времени работы различных устройств ЦВМ между программами, ни распределение между ними емкости ЗУ не могут быть предусмотрены программистом заранее. Это распределение выполняется в процессе самого исполнения программ, т. е. при мультипрограммировании должно осуществляться автоматически самой машиной так называемое динамическое распределение памяти.

Для организации мультипрограммного режима работы ЦВМ в ней используется специальная программа-диспетчер. Кроме того, эффективность мультипрограммирования обеспечивается аппаратной реализацией системы прерывания программы и системы защиты оперативного ЗУ.

Система прерывания программ предназначается для осуществления перехода к той или иной программе в зависимости от поступающих сигналов, причем в случае прерывания программы должно обеспечиваться сохранение всей информации, необходимой для продолжения в дальнейшем работы по прерванной программе.

Система защиты оперативного ЗУ предназначается для контроля всех обращений к нему и для посылки в устройство переработки информации сигнала прерывания исполняемой команды при попытке обращения к защищенной области оперативного ЗУ. Таким образом, без ограничений при программировании можно защитить информацию, которая находится одновременно в оперативном ЗУ, но относится к различным задачам.

Характерной особенностью современных больших ЦВМ является наличие у них многоступенчатой или иерархической системы памяти, представляющей собой комплекс нескольких оперативных ЗУ различной емкости и быстродействия, объединенных в систему каналами обмена информацией между собой и с ЦВМ. Многоступенчатая система памяти состоит обычно из двух или трех самостоятельных ЗУ (ступеней или каскадов). Наиболее быстродействующая ступень характеризуется временем обращения порядка десятых долей микросекунды и емкостью в несколько десятков или сотен слов. В самой большой по емкости ступени хранится несколько десятков или сотен тысяч слов при времени обращения 1—10 *мксек*. Иногда в эту систему включается и ЗУ с магнитной записью на барабанах или дисках, емкость которого может достигать миллионов слов при времени обращения порядка долей секунды. Все эти ЗУ в составе многоступенчатой памяти имеют единую систему адресов. При этом широко применяется метод секционирования, заключающийся в наличии нескольких одинаковых ЗУ со сдвинутыми относительно друг друга временны́ми диаграммами. Благодаря этому последовательные обращения к памяти могут осуществляться с перекрытием во времени, причем извлечение информации из одной секции может совпадать во времени с записью или регенерацией в другой секции. Таким образом достигается снижение среднего времени цикла ЗУ до величины, ме́ньшей фактической длительности цикла отдельной секции.

2-3. Адресные методы выборки

Одной из важнейших проблем теории и техники ЗУ является реализация задачи поиска нужной информации в большом массиве. До недавнего времени (да еще и сейчас почти во всех ЦВМ серийного выпуска) применялись только адресные ЗУ. Поиск информации в этих ЗУ осуществляется по номеру запоминающей ячейки, в которую соответствующая информация была помещена при записи. Этот номер ячейки называют адресом и, таким образом, при записи информации в ЗУ наряду с кодом записываемого слова должен быть подан код адреса ячейки, куда это слово должно быть записано, а при воспроизведении в ЗУ должен быть подан код адреса ячейки, из которой необходимо извлечь информацию.

При этом адрес ячейки может определяться либо ее местоположением в пространстве, как, например, в ЗУ на ферритовых сердечниках, либо ее положением во времени, как в динамических ЗУ на линиях задержки. Соответственно различают два способа поиска: места (S-поиск) и времени (T-поиск).

В некоторых ЗУ имеет место комбинированный S — T-поиск. Например, если оперативное ЗУ на линиях задержки с общей емкостью 1024 слова состоит из четырех контуров рециркуляции емкостью по 256 слов каждый, то первый этап поиска — выбор соответствующего контура осуществляется по принципу поиска места, а второй этап — поиск слова в контуре — по принципу временно́го поиска.

При этом адрес искомой ячейки должен, очевидно, также состоять из двух частей кодов адресов S и T. При кодировании адресов в двоичной системе счисления, когда емкость памяти обычно выражается какой-либо степенью двойки (2^p), эта задача решается весьма просто. Старшие q разрядов кода адреса (в нашем примере $q = 2$) используются в качестве S-адреса, а последующие $(p - q)$ разрядов кода адреса (в нашем примере $p = 10$) образуют код T-адреса. Стремление повысить логические возможности и увеличить производительность ЦВМ обусловливает интерес к совершенствованию методов выборки информации из ЗУ с произвольной выборкой. Методы выборки информации могут быть разделены на простые и сложные. К простым адресным методам относятся выборка одного, двух или более чисел за одно обращение; к сложным методам — выборка чисел переменной длины, косвенная выборка и выборка списками.

Выборка одного числа за обращение является в настоящее время наиболее распространенной. Этот способ выборки применяется в ЦВМ с ЗУ сравнительно небольшого объема, которое может работать со скоростью, равной скорости арифметического устройства. При большом возрастании емкости ЗУ такой способ выборки становится неудобным, так как требует значительного увеличения количества разрядов, отводимых в коде команды для записи адреса.

Выборка нескольких слов за одно обращение — кратная выборка — применяется, когда надо повысить эффективное быстродействие и экономичность ЗУ очень большой емкости. В ряде статей показано, что ЗУ большой емкости получается наиболее экономичным по количеству затрачиваемого электрического оборудования при длине слова в несколько сот бит. Например, при емкости ЗУ в 1 млн. *бит* оптимальная длина слова составляет 707 *бит* [2-20]. Это соответствует длине $10 \div 20$ обычных машинных слов. При этом также и задержка в разрядных цепях и цепях считывания получается минимальной. Недостатком этого способа выборки является усложнение программирования и необходимость иметь большое количество вспомогательных регистров для записи всего длинного слова.

Операции над числами переменной длины необходимы при выполнении большого количества расчетов, особенно при обработке экономической информации. Требование к ЦВМ выполнять операции над числами переменной длины становится обычным для крупных вычислительных машин. Структурно числа или слова переменной длины состоят из некоторого числа слогов.

В качестве слога может быть принят, например, код из восьми двоичных разрядов (*байт*), позволяющий кодировать такие символы, как десятичная цифра, буква или знак препинания.

Для выборки чисел переменной длины можно использовать два метода: выборку с частичным адресом и выборку с избыточным адресом.

Выборка с частичным адресом основана на том, что p двоичных разрядов кода адреса могут определять местоположение 2^p слов в ЗУ. Таким образом, если в адресе задать $(p - q)$ разрядов, то это эквивалентно обращению к 2^q слогам одновременно. Для того чтобы организовать последовательную выборку 2^q слогов, необходимо дополнить недостающие разряды в коде адреса счетчиком, т. е. произвести последовательно обращения к каждому из 2^q слогов. Недостатком этого метода выборки является то, что можно обратиться лишь к двум, четырем, восьми и так далее слогам.

Более гибким методом выборки чисел переменной длины является выборка с избыточным адресом. Сущность этого метода состоит в том, что должна быть предусмотрена возможность выборки каждого слога. Поскольку обычно число состоит из нескольких слогов, то для выборки одного числа потребовалось бы несколько обращений. На практике используется другой прием. При выборке задают адрес только первого слога. Затем автоматически считываются последующие слоги до тех пор, пока не будет считан специальный символ, содержащий признак конца числа. Другим способом определения длины числа является задание ее в коде адреса. Например, в коде адреса может быть отведено четыре разряда, которые могут определить длину слова до 15 *байт*.

Недостатком применения специального символа для обозначения конца числа является неэкономное расходование памяти ЦВМ, так как часть ЗУ занята символами, обозначающими концы чисел. Недостатком указания длины числа в коде адреса является необходимость увеличения числа разрядов в коде адреса. Однако последний способ задания длины числа является наиболее распространенным.

Косвенная выборка состоит в том, что действительный адрес, по которому производится обращение, получается на основе преобразования заданного адреса. Заданный адрес может преобразовываться различными способами. Он может быть изменен с помощью вспомогательных индекс-регистров и базовых регистров. К адресу могут быть добавлены старшие или младшие разряды или некоторая константа, хранящаяся в специальном индекс-регистре. Соответственно различают собственно косвенную выборку, вы-

борку с присоединенным адресом и выборку с относительным адресом.

Основные схемы косвенной выборки иллюстрируются рис. 2-3. В одном из вариантов заданный адрес поступает в блок хранения адресов, где преобразуется, и только затем поступает в ЗУ (рис. 2-3, *а*). В другом варианте (рис. 2-3, *б*) показано, что к адресу прибавляется содержимое одного из индексных регистров, причем адресная часть команды складывается с младшими разрядами индексных регистров. На рис. 2-3, *в* показана схема прибавления к адресной части команды константы (модификация адреса).

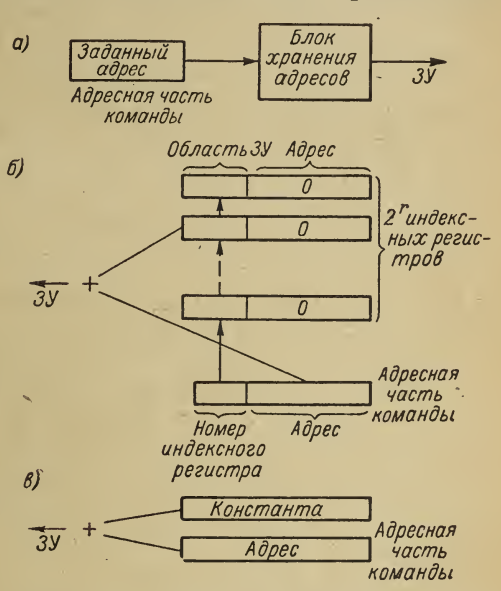


Рис. 2-3. Схема косвенной выборки: *а* — собственно косвенная выборка; *б* — выборка с присоединенным адресом; *в* — выборка с относительным адресом.

Обычно косвенная выборка встречается в тех случаях, когда число разрядов в адресной части команды меньше, чем число разрядов в адресе, необходимом для обращения к ЗУ. Такая ситуация возникает в случае увеличения емкости ЗУ ЦВМ. Стандартным способом преодоления этого затруднения является применение индекс-регистров и базовых регистров, к содержимому которых добавляется адресная часть команды, причем число разрядов в индекс-регистре и в базовом регистре достаточно для обращения к ЗУ повышенной емкости. Если число индекс-регистров равно 2^q, то в адресной части команды требуется дополнительно q разрядов для того, чтобы указать, содержимое какого именно регистра требуется складывать с адресной частью команды.

Можно считать, что старшие разряды суммарного кода адреса, содержащиеся в индекс-регистре, характеризуют область ЗУ, в которой хранится искомая информация, а младшие, которые содержатся в адресной части команды, указывают место внутри данной области.

Косвенная выборка широко применяется при динамическом распределении памяти и динамической перезаписи информации в ЦВМ. Это объясняется тем, что косвенная выборка обеспечивает возможность расположения информации в любом блоке ЗУ, входящем во внутренние и внешние ЗУ ЦВМ. Особенную важность это

приобретает при использовании в одной ЦВМ ЗУ разных типов, отличающихся по быстродействию и емкости.

При косвенной выборке действительное место информации y (адрес) в ЗУ вычисляется по формуле:

$$y = (K \cdot 2^s) + i, \tag{2-1}$$

где K — номер страницы (страницей называется группа из некоторого количества последовательно расположенных ячеек ЗУ); 2^s — размер страницы (S — целое число); i — положение слова внутри страницы, оно задается или в коде команды или со счетчика команд.

Например, в ЦВМ «Атлас» (Англия) предусмотрена выборка одного миллиона слов [2-16]. Эту емкость составляют все виды ЗУ; на ферритовых сердечниках, магнитных барабанах и лентах. Для выборки одного слова необходим адрес длиною в 20 разрядов. Старшие $K = 11$ разрядов образуют номер страницы, а младшие $S = 9$ разрядов — номер слова внутри страницы.

Аналогичная система выборки применена во многих больших вычислительных машинах, при этом меняются лишь объем страницы и число страниц, например, в ЦВМ-500 (фирма «Бюрроуз», США), некоторых ЦВМ серии ИБМ-360 и др.

Во многих случаях информация, обрабатываемая на ЦВМ, может быть представлена в виде списков (например, платежные ведомости зарплаты). При обращении к элементам списка, хранимого в ЗУ, адрес каждого элемента получается в результате обработки списка. Это значит, что выборка информации будет осуществляться по признакам самой информации, так как в один список могут быть объединены элементы информации, обладающие определенным признаком. Термин «список» в данном случае понимается в обычном смысле и означает последовательность элементов информации, которые связаны по какому-либо признаку между собой, причем необязательно, чтобы они находились в соседних ячейках ЗУ. Имеется три основных способа построения списков [2-4]: двухадресный, гнездовой и узловой. Эти способы отличаются формой записи элементов списка, способом установления связи между ними и формой записи подсписков.

Двухадресный способ построения списков (ниточные списки, цепные списки, нанизанные списки) предполагает, что каждый элемент списка состоит из двух частей: собственно информации и адреса связи. Адрес связи указывает ячейку ЗУ, в которой хранится следующий элемент списка. Обработка этих списков напоминает обработку информации в четырехадресных ЦВМ, где четвертый адрес в коде команды указывает следующую команду. Так построены информационные элементы списка. Структурные элементы списка вместо информационной части содержат адрес вершины подсписка. Подсписок строится по таким же законам, как и основной список, и в свою очередь может иметь подсписки.

В двухадресных списках в информационном элементе в качестве информации может быть записан адрес ячейки ЗУ, содержащий нужную информацию. Такой способ представления информационного элемента является наиболее гибким и общим. Каждый элемент списка также содержит информацию о конце списка, о характере элемента (информационный или структурный).

Недостатком двухадресных списков является неэкономное использование памяти. При организации списка более половины всей содержащейся информации является служебной: адреса связи, признаки элементов. Другие способы построения списков имеют целью преодолеть указанные недостатки.

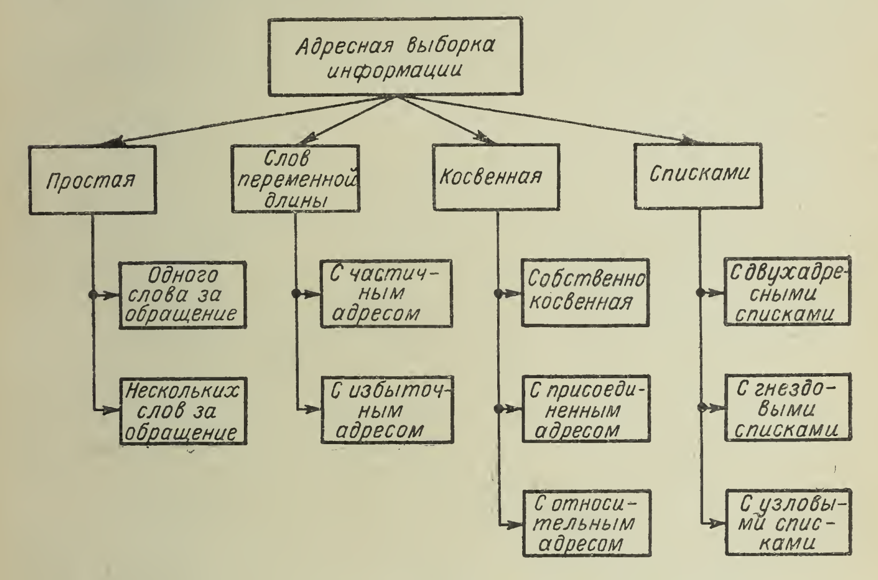


Рис. 2-4. Классификация адресных методов выборки.

Гнездовой способ построения списков (проталкивающие списки, магазинная организация ЗУ, стэки) состоит в том, что элементы списка помещаются в последовательных ячейках ЗУ, так что адрес связи становится ненужным. Ввиду того, что объем списков заранее нельзя предсказать, списки могут находиться в несмежных областях памяти, образуя гнезда, причем связь между ними осуществляется с помощью адресов связи.

Операция записи нового элемента в список осуществляется всегда в вершину списка, при этом старая информация сдвигается. Конечно, это не означает физического перемещения информации в ЗУ, меняется лишь заголовок списка. Операция считывания элемента состоит в последовательном просмотре элементов списка, пока не будет найдена нужная информация.

Узловой способ построения списков (мультилист) состоит в том, что один элемент, являющийся членом нескольких списков, размещается в ЗУ один раз в одной или нескольких последовательных ячейках, образуя ассоциативный узел. В состав ассоциативного узла входят также адреса связи, включающие данный ассоциативный узел в списки, которых может быть несколько. Таким образом, один элемент записывается в ЗУ только один раз.

Выборка списками особенно эффективна при обработке массивов информации. Она не требует жесткого распределения памяти и может быть применена при иерархическом построении ЗУ, при динамическом распределении памяти ЦВМ. Этот вид выборки является удобным в случае, если заранее неизвестен объем обрабатываемой информации.

На рис. 2-4 приведена классификация адресных методов выборки информации.

2-4. Ассоциативные методы выборки

Ассоциативная выборка состоит в том, что информация выбирается из ЗУ не по адресу, а по некоторому признаку ее или по некоторой известной ее части. ЗУ с ассоциативной выборкой называются ассоциативными. Другим термином для обозначения этого типа ЗУ является ЗУ с выборкой по содержанию. Слово в большинстве ассоциативных ЗУ состоит из двух частей. Первую часть слова, предназначенную специально для отыскания его среди других слов, будем называть ассоциативным признаком. Вторую часть, которая содержит интересующую нас информацию, назовем основной информацией (в некоторых случаях ее называют сопутствующей информацией). Ассоциативный признак слова может являться лишь характеристикой основной информации и часто самостоятельного интереса не имеет. Иногда ассоциативный признак слова называют ярлыком или дескриптором. В процессе поиска информации в ЗУ участвуют лишь ассоциативные признаки слов и извлекаются те слова, ассоциативные признаки которых совпадают с заданными на входе известными признаками информации, называемыми признаком опроса. Для каждого слова в ассоциативном ЗУ имеется индикатор совпадения, который указывает, совпадает или нет признак данного слова с признаком опроса. Слово, у которого совпадает ассоциативный признак с признаком опроса, опрашивается и основная информация поступает в выходной регистр.

Принципы построения такого ассоциативного ЗУ иллюстрируются на рис. 2-5. В запоминающих ячейках этого устройства часть разрядных запоминающих элементов отводится для хранения кодов ассоциативных признаков слов (на рис. 2-5 для этого предназначены левые части ячеек *2*). Другие группы запоминаю-

щих элементов ячеек *4* предназначаются для хранения основной информации.

В принципе такое разделение не обязательно, и разряды ассоциативных признаков могут перемежаться разрядами основной информации.

В ряде случаев просто некоторые части основной информации могут быть использованы в качестве ассоциативных признаков при поиске информации. В этих случаях при опросе используется специальный регистр маски (на рисунке не показан), который маскирует разряды основной информации, не участвующие в поиске. Таким образом обеспечивается сравнение разрядов признака опроса только с ассоциативными признаками слов.

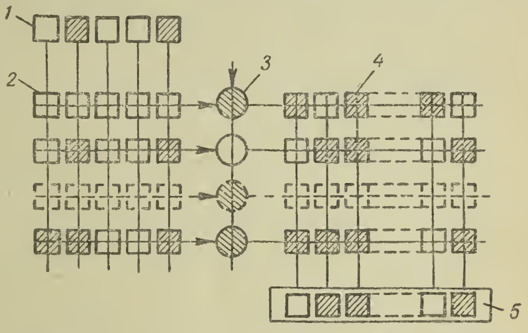


Рис. 2-5. Схема построения ассоциативного ЗУ.

В процессе поиска запоминающие элементы, в которых хранятся ассоциативные признаки, кроме хранения информации, должны выполнять функции ее логического сравнения и неразрушающего считывания. Поэтому накопители ассоциативного ЗУ должны частично или полностью строиться на специальных запоминающих элементах, которые называются ассоциативными запоминающими элементами.

Конструктивно накопитель ассоциативного ЗУ может быть выполнен в виде одного или двух раздельных блоков. В последнем случае один из блоков выполняет функции хранения ассоциативных признаков, а второй предназначается для хранения основной информации.

Накопитель ассоциативных признаков должен быть выполнен на ассоциативных запоминающих элементах. Накопитель основной информации может быть построен на обычных запоминающих элементах.

Для выявления искомого слова предназначаются индикаторы совпадения *3* (см. рис. 2-5). Эти индикаторы фиксируют результат сравнения признаков опроса с ассоциативными признаками слов, причем в случае несовпадения этих признаков индикатор соответствующей ячейки переключается в другое состояние.

Предположим, что в регистр признака опроса *1* подан код 01001, а коды ассоциативных признаков соответствуют показанным на рис. 2-5. Тогда при сравнении совпадение будет иметь место только во второй ячейке, индикатор которой останется в начальном состоянии, а все остальные индикаторы переключаются в другое состояние, показанное на рисунке штриховкой. При подаче импульса

в вертикальную шину, возбуждающую все индикаторы совпадения, переключится только один оставшийся в начальном состоянии индикатор второй ячейки, причем его выходной импульс возбудит словарную (горизонтальную) шину, предназначенную для опроса запоминающих элементов *4*, в которых хранится основная информация. Считанное из этих элементов слово поступает на регистр слов *5*, из которого затем может быть выведено в тот или иной блок кибернетического устройства.

На рассмотренной блок-схеме (рис. 2-5) показаны только некоторые части, принципиально существенные для работы ассоциативного ЗУ. Здесь не показаны и соответственно не описаны части схемы ассоциативного ЗУ, предназначенные для записи информации, и такие важные элементы, как усилители, ключи, формирователи, схема синхронизации. Все эти элементы в принципе не отличаются по своим функциям и построению от соответствующих элементов схем управления адресных ЗУ.

Итак, специфической частью ассоциативного ЗУ является блок ассоциативных признаков. Рассмотрим математическое описание работы одного элемента, выполняющего операцию сравнения, дающего сигнал при несовпадении хранимой и поступающей на вход информации. Такая логическая операция называется «отрицание равнозначности». Она имеет вид:

$$a_{ji} \cdot \bar{z}_i + \bar{a}_{ji} \cdot z_i, \tag{2-2}$$

где a_{ji} — значение i-го разряда в ассоциативном признаке j-го слова; z_i — значение i-го разряда признака опроса.

Логика работы всех разрядов ассоциативного признака j-го слова имеет вид:

$$\omega_j = \sum_i \left(a_{ji} \cdot \bar{z}_i + \bar{a}_{ji} \cdot z_i\right). \tag{2-3}$$

Если $\omega_j = 1$, то ассоциативный признак j-го слова не совпадает с признаком опроса, а если $\omega_j = 0$, то они совпадают.

Рассмотрим другие виды поиска информации. В ассоциативных ЗУ могут быть найдены и выбраны слова, ассоциативные признаки которых находятся в следующих отношениях с признаком опроса: больше, меньше, ближайшее бóльшее, ближайшее мéньшее.

Из ассоциативного ЗУ может быть выбрано слово, ассоциативный признак которого является наименьшим или наибольшим среди хранимых слов. Кроме того, из ЗУ могут быть выбраны слова, лежащие в некоторых заданных пределах или вне их. Последовательное сочетание поиска слова с минимальным по численному значению признаком и поиском ближайшего слова ведет к упорядоченной выборке слов в порядке возрастания их ассоциативных признаков.

Простой способ упорядоченной выборки, предложенный Ю. Я. Базилевским в 1958 г., состоит в том, что в качестве признака опроса одно за другим задаются последовательно возрастающие числа. Для задания этих чисел может использоваться обычный двоичный счетчик, на вход которого поступают положительные единицы.

Основным недостатком упорядоченной выборки методом циклического обзора является большое количество опросов, не приводящих к считыванию информации. В других методах упорядоченной выборки это число значительно меньше. Большинство методов упорядоченной выборки строится по принципу: поиск минимального (максимального) признака, а затем поиск ближайшего бо́льшего (ме́ньшего).

При каждом опросе учитывается количество слов, признаки которых совпадают с признаком опроса. Установка следующего признака опроса зависит от этого количества. При этом различают несколько алгоритмов упорядоченной выборки. Для первого алгоритма, предложенного Фреем и Гольдбергом в 1961 г. [2-13], достаточно знать, что в результате опроса не выявлено слов с признаками, совпадающими с признаком опроса, или выявлено хотя бы одно слово. Для другого алгоритма, предложенного Сибером и Линдквистом в 1962 г. [2-10], выявляется следующая информация о количестве слов с совпадающими признаками: нет слов с совпадающими признаками, имеется только одно слово, имеется несколько слов.

После того, как найдено слово с минимальным признаком, происходит поиск ближайшего бо́льшего.

В настоящее время известно до десяти методов упорядоченной выборки, отличающихся по своей эффективности [2-3, 2-12, 2-18 и др.]. Однако с увеличением эффективности метода, как правило, возрастает и сложность его технической реализации.

Применение ассоциативных ЗУ оправдывается следующими их достоинствами: 1) осуществление поиска информации по ее признакам; 2) возможность логической обработки информации внутри ассоциативного ЗУ; 3) относительная независимость времени поиска информации в ассоциативном ЗУ от общей его емкости; 4) отсутствие жесткой связи между содержанием запоминающей ячейки и ее номером, что обеспечивает более гибкое использование общей емкости ассоциативного ЗУ.

Эти качества обеспечивают эффективное применение ассоциативных ЗУ для решения ряда весьма сложных задач, к которым относится обработка информации в информационно-логических машинах, динамическое распределение памяти, опознание образов [2-5].

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ХРАНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ НА ПЕРФОНОСИТЕЛЯХ

3-1. Перфокарты

Перфокарты нашли широкое применение в счетно-аналитических машинах, которые называют также счетно-перфорационными машинами [3-2, 3-10 и др.].

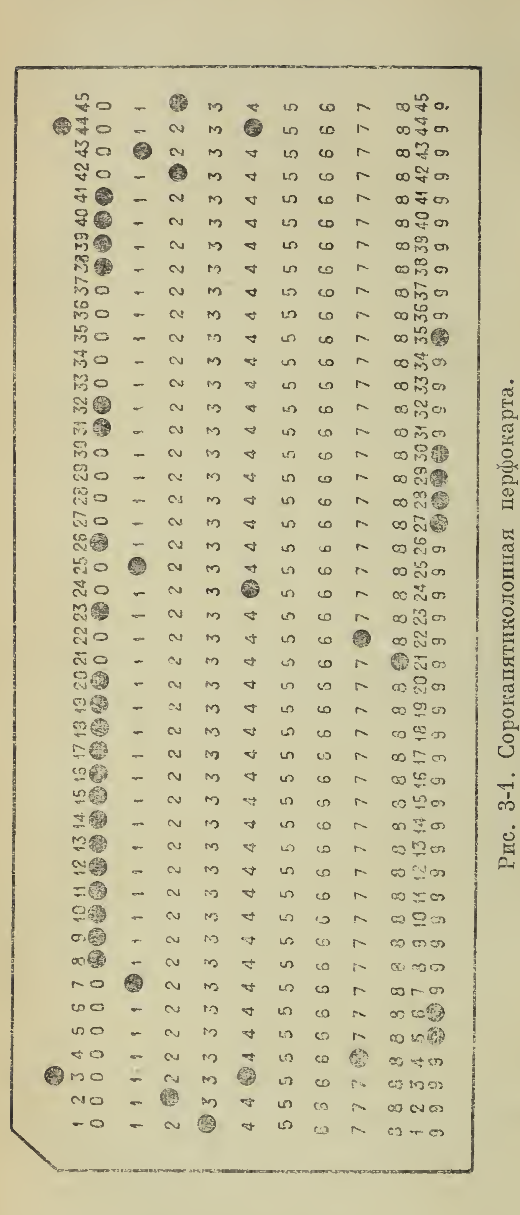


Рис. 3-1. Сорокапятиколонная перфокарта.

Процессы обработки материалов на этих машинах состоят из нескольких этапов. Прежде всего на перфораторах производится пробивка отверстий в картах. Затем на специальных машинах-контрольниках осуществляется контроль перфорации путем сличения ее с повторно осуществляемым на клавиатуре контрольника набором. После этого перфокарты сортируются по определенным признакам на специальных машинах и, наконец, в качестве последнего этапа обработки, разложенные по группам перфокарты поступают на табуляторы, которые осуществляют подсчет и печатание данных, содержащихся в перфокартах.

Стандартная перфокарта (рис. 3-1) представляет собой картонный прямоугольник длиной 187,4 *мм* с допуском $\pm 0{,}1$ *мм*, шириной 82,5 *мм* с допуском $\pm 0{,}1$ *мм* и толщиной 0,18 *мм* с допуском $+0{,}020$ и $-0{,}015$ *мм*. Для удобства операций подбора и укладки левый верхний угол карты обрезан, причем каждый катет обрезанного угла должен быть равен 7 *мм*, а угол среза $45 \pm 2°$. Толщина карты выбирается исходя из того, чтобы, с одной стороны,

обеспечивалась хорошая изоляция при электрическом считывании, а, с другой стороны, пробивка отверстий не требовала больших усилий. При толщине 0,18 *мм* усилие, необходимое для пробивки одного отверстия, составляет 3,5—4 *кГ*.

На лицевой стороне перфокарты нанесена цифровая сетка, образующая вертикальные колонки и горизонтальные ряды или позиции. В СССР применяются перфокарты двух типов: 45-колонные (рис. 3-1) и 80-колонные (рис. 3-3). Количество рядов во всех случаях равно десяти (от 0 до 9), однако в надцифровом поле карты могут быть пробиты еще два ряда отверстий (11-й и 12-й), которые в счетно-аналитических машинах используются для фиксации различных условных признаков.

Десятичные цифры фиксируются на перфокартах путем пробивки отверстий, каждое из которых соответствует одной цифре. При этом информация на перфокарте может записываться двумя способами, соответствующими подаче карты для считывания широкой или узкой стороной. В первом случае считывание производится построчно, во втором — осуществляется последовательное считывание по столбцам. Чаще всего разряд числа определяется номером колонки, а значение цифры в разряде — ее позицией. Например, на перфокарте, изображенной на рис. 3-1, в колонках 1—5 зафиксировано число 32 479, в колонках 6—10 — число 91 000 и т. д.

Отверстия в 45-колонных перфокартах делаются круглыми с диаметром 3,2 *мм* с допуском $\pm 0,03$ *мм*. В 80-колонных перфокартах отверстия имеют форму прямоугольника с основанием 1,4 *мм* и высотой 3,2 *мм*.

При вводе в электронные машины,работающие в двоичной системе счисления, целесообразно фиксировать числа на перфокартах в двоично-десятичной системе счисления. В частности, на рис. 3-2 показано расположение чисел и дополнительной информации на 80-колонных перфокартах, применявшихся в машине «Стрела» [3-12]. При этом для записи чисел используются все двенадцать рядов перфокарты, что позволяет размещать на одной перфокарте до 960 *дв. цифр*. Таким образом, максимальная поверхностная плотность записи, которая может быть достигнута на перфокартах, составляет:

$$\frac{960}{18,74 \cdot 8,25} = 6,34 \text{ дв. цифр/см}^2,$$

или объемная:

$$\frac{6,34}{0,018} = 355,2 \text{ дв. цифр/см}^3.$$

На рис. 3-3 изображена 80-колонная перфокарта с записанной на ней информацией.

Скорость заготовки перфокарт, т. е. пробивки в них отверстий, соответствующих фиксируемой информации, при ручной перфорации определяется квалификацией оператора и составляет до двух цифр в секунду. При автоматической перфо-

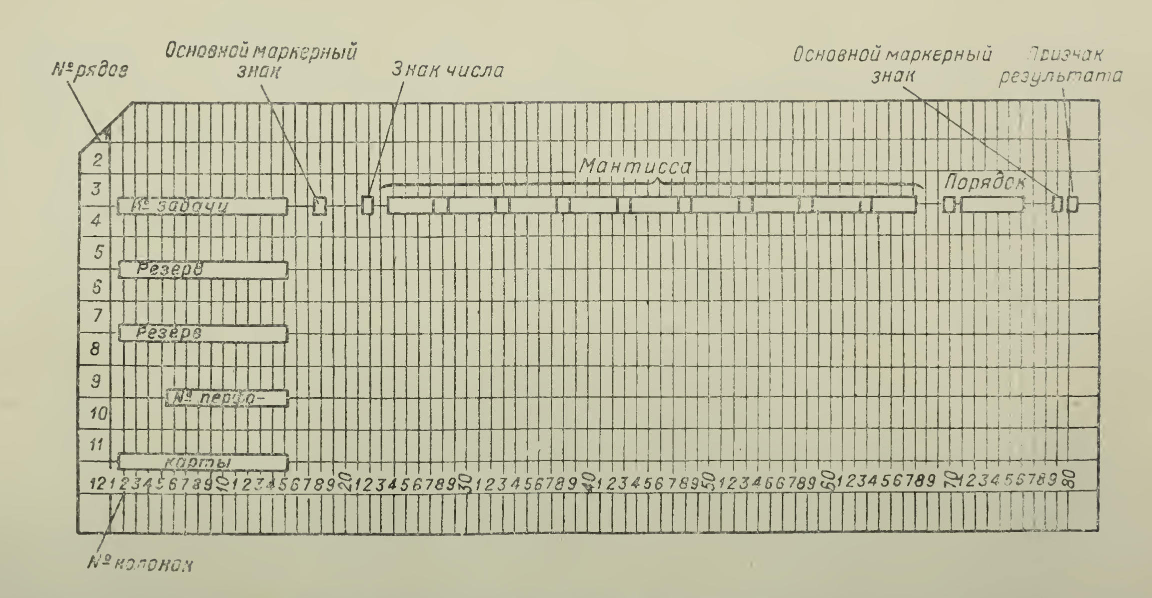


Рис. 3-2. Размещение чисел и дополнительной информации на восьмидесятиколонной перфокарте.

рации, которая предназначается для размножения подготовленных оператором перфокарт, перезаписи информации на перфокарты с перфоленты или магнитной ленты и так далее, максимальная скорость может достигать сотен цифр в секунду.

После пробивки на перфораторе, контроля и сортировки карты из колод подаются для считывания в машине подающим ножом, который захватывает карту немного больше, чем на половину ее толщины. Это обусловливает исключительную важность правильного выбора толщины и жесткости материала карты с тем, чтобы обеспечить ей необходимые механические свойства в отношении деформаций и разрывов.

Считывание информации с перфокарт производится либо электромеханическим способом — ощупыванием отверстий контактными щетками, что наиболее широко применяется в счетно - аналитической технике, либо фотоэлектрическим способом — при помощи фотоэлементов или фотодиодов. При фотоэлектрическом считывании перфокарт скорость считывания может быть доведена до тысяч цифр в секунду.

Рис. 3-3. Восьмидесятиколонная перфокарта с записью информации в двоично-десятичной системе.

Перфокарты весьма удобно применять для ввода информации в машины, предназначенные для экономических, статистических, плановых и других расчетов подобного типа, когда вводимая информация (наряды, счета, бухгалтерские документы, данные переписи и т. д.) имеет общий большой объем и в то же время состоит из отдельных, независимых друг от друга частей. Важным достоинством перфокарт при этом является возможность подборки их в колоде перед закладкой в машину в любом порядке и, следовательно, возможность ввода информации в вычислительную машину в любой желательной последовательности.

В то же время следует указать на относительную сложность механической конструкции устройств, предназначенных для обработки перфокарт, так как при перфорации и считывании наряду с поступательным движением каждой карты необходимо еще осуществлять сбрасывание использованной карты и извлечение следующей карты из колоды. Таким образом, необходимо иметь весьма точные механизмы с возвратно-поступательными движениями, относительно дорогие и требующие сложной регулировки.

В заключение следует упомянуть о применении перфокарт особого типа с краевой перфорацией [3-6, 3-9], на которых строятся простейшие и самые распространенные постоянные ЗУ, позволяющие осуществлять такие операции, как сортировка информации, группировка ее по нужным признакам, подбор сведений, анализ опытных данных и т. д.

Хотя такие картотеки на перфокартах и не принято называть постоянными ассоциативными ЗУ, но принцип выборки из них информации по определенным признакам поиска совпадает с принципом выборки из современных электронных ассоциативных ЗУ [2-5].

3-2. Перфоленты

Наряду с перфокартами почти во всех современных машинах в качестве носителя информации в устройствах ввода и вывода используются перфоленты. В большинстве отечественных машин для этой цели применяется стандартная бумажная телеграфная лента шириной 17,5 *мм* с пятью основными дорожками. Числа при вводе в машину чаще всего кодируются в двоично-десятичной, а команды — в восьмеричной системе счисления. При этом десятичная и восьмеричная цифра каждого разряда выражается в двоичном коде и фиксируется на ленте в одном вертикальном ряду.

На рис. 3-4 показан участок перфоленты, используемой для ввода информации в машину «Минск-2». Пробивка на первой дорожке сверху соответствует наличию в коде данного разряда единиц, на второй сверху — двоек, на третьей — четверок и на четвертой — восьмерок. Нижняя дорожка предназначается для пробивок, имеющих служебное значение.

Поверхностная плотность записи на такой пятидорожечной перфоленте, характеризующейся шагом 2,54 *мм*, составляет:

$$\frac{5}{0{,}254 \cdot 1{,}75} = 11{,}2 \textit{ дв. цифр/см}^2,$$

т. е. почти в два раза больше, чем на перфокартах. При толщине ленты 0,1 *мм* это соответствует объемной плотности:

$$\frac{11{,}2}{0{,}01} = 1120 \textit{ дв. цифр/см}^3,$$

т. е. приблизительно в три раза больше, чем на перфокартах.

Пробивка ленты, как и перфокарты, производится вручную или автоматически на специальном перфораторе, причем шаговое продвижение ленты осуществляется зубчатым колесом при помощи шестой, ведущей дорожки с отверстиями малого диаметра.

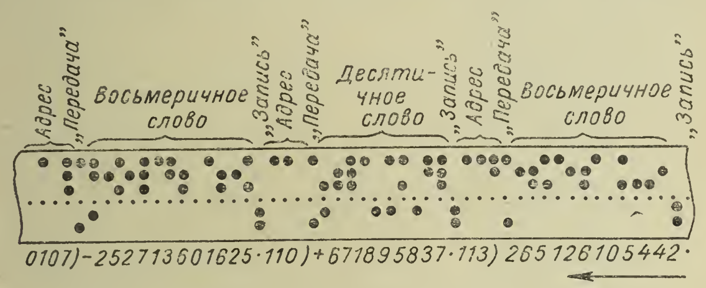


Рис. 3-4. Участок перфоленты машины «Минск-2».

Во избежание ошибок при вводе в машину одна и та же задача наносится на перфоленту дважды (желательно двумя операторами), и затем обе перфоленты сличаются на специальном контрольно-считывающем устройстве. При несовпадении перфораций на сличаемых лентах это устройство автоматически прекращает их дальнейшее продвижение и дает сигнал оператору о наличии ошибки.

Другой вариант проверки состоит в том, что заготовленная перфолента вставляется в контрольное устройство, а оператор повторно набирает ту же задачу. Несовпадение записи на ленте с информацией, набранной оператором, вызывает появление сигнала ошибки. Во всех случаях место несовпадения проверяется простым осмотром, и если на ленте отсутствует нужное отверстие, то производится его дополнительная пробивка, а лишние отверстия заклеиваются. Если требуется исправление целых участков перфоленты, то последняя разрезается, удаляются или вставляются соответствующие отрезки и лента вновь склеивается.

Скорость перфорации ленты вручную, как и перфокарт, одна-две цифры в секунду, а автоматической — до сотен цифр в секунду.

Считывание информации с перфоленты может производиться теми же способами, что и с перфокарт, т. е. электромеханическим —

путем ощупывания ленты щетками, и фотоэлектрическим. Однако, так как механическая прочность ленты ниже, чем перфокарт, а восстановление ленты связано с бо́льшими трудностями, то считывание контактными щетками допускается лишь при небольшой кратности использования лент. При считывании с ленты для ее продвижения могут, как и при перфорации, использоваться зубчатые колеса, но чаще применяются фрикционные валики, обеспечивающие бо́льшую механическую сохранность при значительно бо́льших скоростях ее протягивания. Скорость считывания с перфоленты может достигать такого порядка, как и при считывании с перфокарт, т. е. тысяч цифр в секунду. Хотя благодаря равномерному движению ленты ее линейная скорость и достигает значительно большей величины, чем линейная скорость перфокарты, но зато на перфокартах имеется возможность параллельной обработки до 80 разрядов.

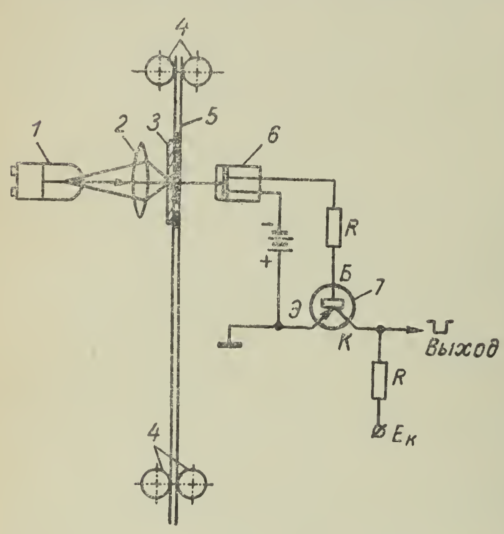


Рис. 3-5. Схема считывания информации с перфоленты с помощью фотодиодов.

1 — точечный источник света; 2 — линза; 3 — полочка; 4 — фрикционные валики; 5 — перфолента; 6 — фотодиод; 7 — транзистор.

На рис. 3-5 изображена схема считывания информации с перфоленты с помощью фотодиодов, обеспечивающих высокую скорость и надежность считывания. Устройство, основанное на подобном принципе, предназначенное для ввода данных в быстродействующие цифровые машины [3-7], обеспечивает считывание с перфоленты со скоростью до 1500 *строк/сек* при скорости движения ленты 5,5 *м/сек*.

Значительное ускорение перфорации и считывания перфолент может быть достигнуто увеличением их ширины и соответствующим увеличением количества пробивок в поперечной строке (количества дорожек). Однако это приводит к усложнению оборудования, которое становится соизмеримым по стоимости с оборудованием для обработки перфокарт. Поэтому, хотя диапазон применяемых перфолент включает ленты шириной от 5 *мм* (однодорожечные) до 182 *мм* (90 дорожек), наибольшее практическое применение в отечественных машинах получили лишь ленты 17,5 *мм* (5 дорожек) и реже — 22,5 и 25 *мм* (соответственно 6 и 8 дорожек).

Срок службы перфоленты зависит от способа считывания, качества лентопротяжного механизма и ускорений, возникающих

при движении ленты. Этот срок обычно невелик (считается, что бумажная перфолента допускает 35—40 обращений или прогонов для ввода информации), но применение автоматических реперфораторов позволяет быстро и почти без затрат времени оператора изготовлять копии перфолент для замены износившихся экземпляров.

Бумажные перфоленты нашли самое широкое применение для ввода, а в ряде случаев и для вывода информации во многих отечественных и зарубежных машинах. В ряде созданных в нашей стране и за рубежом систем автоматического программного управления металлообрабатывающими станками и другими производственными агрегатами программа обработки изделий задается перфолентой, которая пропускается через читающее устройство так называемого командоаппарата, осуществляющего управление рабочими органами станка.

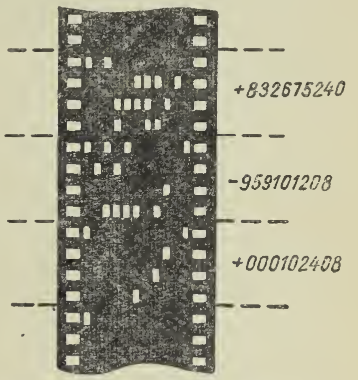


Рис. 3-6. Перфорированная непрозрачная кинопленка для ввода информации в машину «Урал».

Наряду с бумажными перфолентами раньше применяли также непрозрачную кинопленку стандартной ширины 35 *мм*. Основным достоинством кинопленки является бо́льшая износоустойчивость (она допускает сотни прогонов вводимого материала без заметных деформаций). Правда, при стирании фотоэмульсии прозрачный участок может быть воспринят как информативный. Однако при немногократном вводе большого объема информации относительно высокая стоимость пленки и трудность ее обработки неблагоприятно сказываются на общих экономических показателях эксплуатации машины.

В частности, перфорированная засвеченная кинопленка применялась для ввода информации в серийных советских машинах «Урал-1» и «Урал-2». На рис. 3-6 приведена фотография участка такой кинопленки с записанной на ней информацией. При этом, как видно из рисунка, перфорация производится на 11 дорожках, из которых 9 дорожек справа предназначаются для записи чисел, закодированных по двоично-десятичной системе, на десятой дорожке записывается знак числа и на одиннадцатой (крайней слева) — маркерная пробивка, сигнализирующая начало нового числа. Так как машины «Урал-1» и «Урал-2» оперируют с девятиразрядными десятичными числами, а двоичный код каждой десятичной цифры содержит четыре разряда, то запись всего числа занимает на ленте четыре поперечных строки. На участке перфопленки, представленном на рис. 3-6, записаны, например, три числа: +832 675 240, —959 101 208 и +000 102 408.

На одном рулоне такой перфоленты длиной 250 *м* размещается до 10000 чисел. При этом скорость ручной перфорации на клавишном устройстве составляет до 10 *чисел/мин*, скорость автоматической перфорации — до 200 *чисел/мин* и скорость ввода информации с перфоленты в машину — до 5000 *чисел/мин*.

В заключение сравним между собой два вида перфоносителей: перфокарты и перфоленты.

По скорости записи и считывания оба этих носителя почти равноценны.

Сохранность перфолент при продвижении их с помощью ведущих отверстий ниже, чем у перфокарт, а при продвижении с помощью фрикционных роликов перфоленты сохраняются лучше.

Комплектация вводимой информации в любом порядке может быть простым способом осуществлена лишь при использовании перфокарт.

Габариты и стоимость оборудования для обработки перфокарт выше, чем существующего оборудования для узких перфолент; однако с увеличением ширины ленты это различие уменьшается.

Эксплуатация перфокарточного оборудования требует бо́льших затрат труда оператора и бо́льшего расхода электрической энергии.

Большие универсальные машины, как правило, оборудуются устройствами ввода информации как с перфолент, так и с перфокарт. Особенно удобно применять перфокарты в тех случаях, когда они могут заготовляться в различных географических пунктах, пересылаться по почте, сортироваться в нужном порядке и затем вводиться в машину.

Следует указать, наконец, что иногда для значительного ускорения ввода и вывода информации в качестве промежуточного носителя используют магнитную ленту. Для этого при вводе информацию предварительно переписывают на специальных устройствах с перфокарт или перфоленты на магнитную ленту, которая уже затем считывается в устройстве ввода со скоростью порядка нескольких тысяч цифр в секунду. Аналогично при выводе информация с большой скоростью записывается на магнитную ленту, а затем с последней переписывается на перфоносители, которые уже и управляют печатающими устройствами.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА С МАГНИТНОЙ ЗАПИСЬЮ

4-1. Основные принципы магнитной записи информации

Магнитная запись была изобретена и практически опробована еще в 1898—1900 гг. датским физиком В. Паульсеном, применившим в качестве носителя информации стальную проволоку. Однако только с появлением в 20-х годах электрических усилителей

и разработкой в 30-х годах таких удобных носителей, как магнитная лента, создались предпосылки для широкого применения магнитной записи звука. С начала 40-х годов и особенно в послевоенный период магнитофоны получили широчайшее бытовое применение для звукозаписи, а в последние годы все шире развивается и техника магнитной записи изображений, главным образом, для консервации телевизионных программ.

С 1947 г. в связи с появлением первых ЦВМ началась интенсивная разработка систем магнитной записи информации, представленной в цифровой форме. В современных ЦВМ магнитная запись используется для создания внешних, внутренних и промежуточных ЗУ, а также в устройствах ввода и вывода данных.

В качестве внешних ЗУ чаще всего используются устройства с магнитной лентой, на которую перезаписываются данные, считываемые электромеханическим или фотоэлектрическим методом в устройстве ввода с перфокарт или перфоленты. На магнитную ленту обычно записываются в машинах также подлежащие выводу результаты решения задач. Затем они считываются, усиливаются и в виде кодовых импульсов посылаются на перфораторы для перезаписи на перфокарты или перфоленту, которые уже и управляют работой печатающего устройства.

В некоторых наиболее быстродействующих машинах осуществляется непосредственный ввод данных с магнитной ленты, а также применяются устройства, печатающие выводимую информацию непосредственно с магнитной ленты со скоростью до 1000 цифр в секунду и более.

В качестве внешних и буферных ЗУ широкое распространение получили также магнитные барабаны, а в последнее время — ЗУ на магнитных дисках. В некоторых, сравнительно медленно действующих машинах магнитные барабаны используются и в качестве внутренних оперативных ЗУ.

Большое распространение получила магнитная запись для хранения программы работы автоматических металлорежущих станков и других производственных агрегатов. Магнитная запись используется также для автоматического переприема телеграмм, автоматической регистрации данных научных экспериментов, телеметрических данных и т. д.

Столь широкое и многообразное применение ЗУ, основанных на магнитной записи, объясняется рядом преимуществ их по сравнению с другими видами. Они являются наиболее компактными, дешевыми и весьма надежными накопителями информации. ЗУ с магнитной записью в процессе эксплуатации потребляют относительно мало энергии, сохраняют очень большое количество информации в течение длительного времени, не требуя реставрации, и при выключенном питании. Ценными положительными свойствами этих ЗУ являются также возможность многократного использования носителя информации, большая скорость записи и считывания, обеспечивающая синхронную работу их с другими

устройствами цифровых вычислительных машин и, наконец, отсутствие промежуточных процессов между записью и считыванием.

Основным недостатком ЗУ с магнитной записью является относительно большое время обращения, которое колеблется в пределах от единиц миллисекунд у вращающихся с большой скоростью магнитных барабанов до нескольких минут у ЗУ на магнитной ленте.

Физической основой магнитной записи является свойство ферромагнитных материалов сохранять состояние остаточной намагниченности. Процесс перемагничивания характеризуется петлей гистерезиса, изображенной на рис. 4-1.

Условно приписав состояниям остаточной намагниченности $+B_r$ и $-B_r$ два различных значения «0» и «1», можно использовать описанные свойства ферромагнитных материалов для хранения информации, закодированной в двоичной системе счисления.

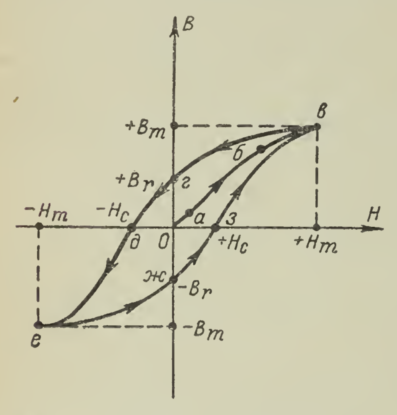


Рис. 4-1. Петля гистерезиса ферромагнитного материала.

В рассматриваемых в настоящей главе устройствах с магнитной записью накопление информации осуществляется соответствующим намагничиванием участков поверхности носителя информации.

В качестве магнитного носителя информации первоначально использовалась стальная проволока. В вычислительной технике магнитная запись на стальной проволоке применялась, например, в американской машине СЕАК (1952 г.). В устройствах ввода этой машины имелся блок считывания с бумажной перфоленты и перезаписи вводимой информации на непрерывно движущуюся проволоку, заключенную в специальную кассету с двумя катушками. Стандартная кассета содержала около 540 *м* проволоки из нержавеющей стали, на которой можно записать около 14 000 45-разрядных чисел. В дальнейшем проволока была заменена стальной лентой. На проволоке удается осуществить только однодорожечную запись. Существенным недостатком стальной проволоки или ленты является трудность соединения концов в случае обрыва.

В настоящее время в ЗУ с магнитной записью почти повсеместное распространение получили магнитная лента и магнитные барабаны. В последнее время расширяется также применение ЗУ на магнитных дисках.

В качестве поверхностных магнитных носителей информации наибольшее распространение получили тонкие, порядка нескольких десятков микрон, магнитные покрытия из ферролака на немаг-

нитной основе. Ферролак представляет собой порошковый ферромагнитный материал, находящийся в дисперсном состоянии в каком-либо связующем веществе типа нитрата целлюлозы, виниловых соединений, ацетата целлюлозы и др.

Доля магнитного порошка в ферролаке составляет 25—45%. Порошок состоит из мелких, размером 0,3—0,8 *мкм*, кристалликов окиси железа. Чаще используется красная (γ-Fe_2O_3), реже — черная (Fe_3O_4) окись железа. Некоторыми зарубежными фирмами применяются композиции из красной и черной окисей, смешанных в различных пропорциях. Ферромагнитные порошки с размером частиц менее одного микрона характеризуются коэрцитивной силой 180—640 *а/см* и остаточной индукцией 40—100 *мтл*.

Важным показателем, характеризующим качество ферромагнитного покрытия, является отношение коэрцитивной силы к остаточной индукции H_c/B_r. Для порошковых покрытий желательно, чтобы это отношение было не менее $4\ \frac{a/см}{мтл}$. Повышение коэрцитивной силы уменьшает эффект саморазмагничивания, особенно заметный на высоких частотах, но затрудняет стирание записанной информации. Увеличивать же отношение H_c/B_r за счет уменьшения остаточной индукции невыгодно, так как это ведет к уменьшению уровня полезных сигналов при считывании информации.

Отечественной промышленностью изготовляются порошки двух видов: кубический гамма-окисел железа для ленты типа 1 и смешанный железо-кобальтовый феррит для ленты типа 2. Кроме того, для ленты типа 3 разработан магнитный порошок МПЗ-3, представляющий игольчатый гамма-окисел железа с улучшенными магнитными свойствами.

Если магнитные ленты, как правило, представляют собой слой ферролака на немагнитной, чаще всего пластмассовой основе, то при изготовлении накопительных магнитных барабанов и дисков наряду с ферролаком все большее применение находят различные гальванические покрытия. В частности, хорошо себя зарекомендовало покрытие в виде сплава из 80% кобальта и 20% никеля, наносимое электролитическим методом слоем толщиной 7—15 *мкм* на тщательно очищенную поверхность барабана. Применяются также и чисто никелевые покрытия и никель-кобальтовые покрытия с преимущественным содержанием никеля.

В табл. 4-1 приведены основные показатели некоторых магнитных покрытий, полученные в результате исследования их во Всесоюзном научно-исследовательском институте звукозаписи.

В процессе магнитной записи подлежащий намагничиванию транспортируемый носитель информации подвергается действию намагничивающего поля того или иного знака и интенсивности, в связи с чем отдельные незначительной величины участки превращаются в постоянные магниты, сохраняющие записанную информацию. При считывании магниты, двигаясь относительно

считывающего устройства, возбуждают в его обмотке импульсы э. д. с., соответствующие записанной информации.

Таблица 4-1

Тип магнитного покрытия носителя информации	Внутренняя коэрцитивная сила, *а/см*	Остаточная индукция, *мтл*	Толщина, *мкм*
ИЗ-337 (порошок 103а)	180	60	13,5
ИЗ-327 (порошок 129а)	280	70	24,4
ИЗ-258 (порошок 100а)	380	77	34,4
ИЗ-309 (порошок 114а)	495	90	55,6
ИЗ-257 (порошок 101а)	640	90	72,0
Электролитический кобальт	24	320	9,6
Электролитический никель	6	340	2,56

В соответствии с ориентацией элементарных магнитов в носителе информации относительно направления его движения различают три вида магнитной записи (рис. 4-2):

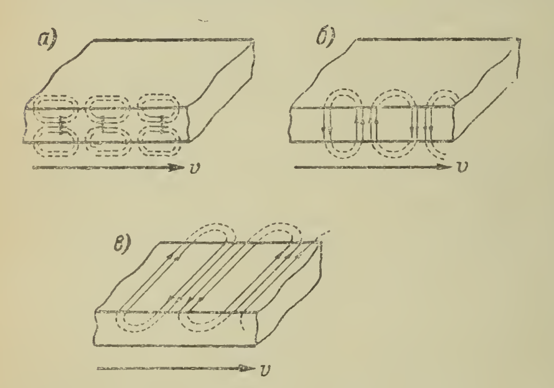


Рис. 4-2. Расположение элементарных магнитов при различных видах намагничивания. Стрелкой показано направление движения носителя.

1) продольное намагничивание, когда все элементарные магниты ориентированы в направлении движения носителя (рис. 4-2, *а*);

2) поперечное намагничивание первого рода, когда все элементарные магниты ориентированы перпендикулярно плоскости носителя (рис. 4-2, *б*);

3) поперечное намагничивание второго рода, когда все элементарные магниты намагничены параллельно плоскости носителя и перпендикулярно направлению движения (рис. 4-2, *в*).

В современных ЗУ с магнитной записью применяется почти исключительно запись с продольным намагничиванием. Поэтому в дальнейшем все изложение ведется в предположении, что применен именно этот вид записи.

Необходимое для записи магнитное поле создается так называемыми магнитными головками. Магнитная головка представляет собой специально сконструированный, чаще всего кольцевой, электромагнит с щелью, по обмотке которого пропу-

скаются импульсы тока записи (рис. 4-3). Проходящий по сердечнику головки магнитный поток в области немагнитного зазора сердечника выходит в воздух и при небольших размерах зазора создает строго локализованное в пространстве магнитное записывающее поле. Силовые линии этого поля, стремясь пройти по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, замыкаются через участки магнитного носителя, движущегося в непосредственной близости от зазора головки, и намагничивают их.

Для считывания может быть использована та же самая магнитная головка или отдельная головка такой же конструкции. При этом поле элементарных магнитов движущегося носителя, при прохождении их мимо зазора головки, создаст в ее магнитопроводе изменяющийся по величине магнитный поток того или иного направления, в результате чего в обмотке головки наводится соответствующая э. д. с., являющаяся сигналом считывания информации.

Рис. 4-3. Схема записи кольцевой магнитной головкой.

1 — магнитный носитель; *2* — сердечник головки; *3* — обмотка головки.

Одним из существенных преимуществ ЗУ с магнитной записью является их большая компактность, которая обеспечивается высокой плотностью расположения элементарных магнитов на поверхности носителя. Различают продольную и поперечную плотность записи.

Продольной (линейной) плотностью называют число кодовых импульсов, размещающихся на 1 *мм* длины магнитного носителя. Очевидно, продольная плотность $p_л = 1/l_ш$, где $l_ш$ — шаг записи, или расстояние между осями магнитных диполей, соответствующих записанным импульсам.

Продольная плотность ограничивается взаимным влиянием полей, создаваемых смежными намагниченными участками носителя. Это взаимовлияние возникает в том случае, когда шаг записи оказывается меньше длины намагниченных участков, т. е. при так называемой записи с перекрытием. Вследствие взаимовлияния смежных сигналов возникают искажения формы и амплитуды сигналов считывания. В определенных пределах такие искажения допустимы, что позволяет повышать предельную плотность, широко используя запись с перекрытием. Однако основным путем повышения продольной плотности является уменьшение длины магнитных отпечатков на носителе, что достигается возможно более близким расположением головки к носителю и уменьшением ширины рабочего зазора головки.

В серийно выпускаемых ЗУ на магнитной ленте продольная плотность обычно не превышает 20—40 *имп/мм*. Однако в некоторых ЗУ она достигает и больших значений. Так, ЗУ «Potter 90 611» (США) работает с плотностью 60 *имп/мм* [4-11].

В некоторых экспериментальных разработках достигнута плотность до 200 и даже 400 *имп/мм* [4-12].

Поперечная плотность $p_п$ определяется расстоянием или шагом $d_ш$ между дорожками в поперечном направлении. Величина шага между дорожками зависит от ширины головок и колеблется обычно в пределах $d_ш = 0{,}5 \div 2{,}5$ *мм*. Таким образом, величина $p_п$ приближается к двум дорожкам на миллиметр.

Результирующая поверхностная плотность, равная $p = p_л p_п$ может достигать практически сотни и более бит на квадратный миллиметр. Однако в настоящее время широкое распространение получила запись с плотностью, не превышающей нескольких десятков бит на квадратный миллиметр.

Теоретические соображения о конечных пределах плотности магнитной записи, обусловленных тепловыми колебаниями, приводят к выводу о принципиальной возможности записи с плотностью до 10^8 *бит/мм*^{2}. Однако в ближайшее десятилетие, по-видимому, не следует рассчитывать на возможность создания ЗУ с плотностью записи более 10^3—10^4 *бит/мм*^{2}.

4-2. Способы записи

Представление двоично-кодированных чисел в виде расположенных в определенной последовательности намагниченных участков на поверхности носителя может осуществляться различными способами.

По количеству используемых различных состояний магнитного носителя различают запись по двум или трем уровням.

В первом случае используются два возможных состояния носителя: насыщение его либо в положительном, либо в отрицательном направлении. Этим состояниям и приписываются соответственно значения записи «0» или «1». Принципиально возможно также приписать значение «0» ненамагниченному состоянию носителя, а значение «1» — намагниченному состоянию. Однако последний способ практически осуществим труднее, так как при нем требуется размагничивание носителя (стирание информации), и поэтому он почти не находит практического применения.

Во втором случае — при записи по трем уровням — используются три состояния носителя: намагниченное до насыщения в том или ином направлении — для записи «0» или «1» и размагниченное состояние, соответствующее отсутствию всякой записи, т. е. интервалам между двоичными цифрами внутри числа, интервалам между числами и т. д.

По характеру возможных изменений состояний носителя различают запись с промежутками, или, как ее называют в зарубежной литературе, с возвратом к нулю, и без промежутков, или без возврата к нулю.

В первом случае каждая двоичная цифра изображается в виде участка носителя, отделенного от соседних участков. Поэтому

состояние носителя должно изменяться в том случае, когда на соседних участках его записана одинаковая информация — единица. При записи без промежутков между знаками магнитное состояние носителя изменяется от одного уровня к другому лишь в том случае, если следующая двоичная цифра отличается от предшествующей.

Рассмотрим некоторые варианты этих способов на примере записи одного и того же числа 101 100.

Запись по двум уровням с промежутками. На рис. 4-4 представлены кривые, характеризующие способ записи по двум уровням с промежутками.

На графике *а* показано изменение во времени тока записи $i_з$ в обмотке записывающей головки.

Кривая *б* представляет изменения магнитного потока вдоль носителя информации. Здесь по оси абсцисс отложены значения длины носителя $l = vt$, где v — скорость перемещения носителя. Поток Φ изменяется в результате записи от некоторого начального уровня Φ_0, соответствующего, как правило, состоянию насыщения одного знака, до уровня Φ_1, соответствующего состоянию насыщения противоположного знака. Предполагается, следовательно, что носитель заранее намагничивается до насыщения в одном направлении, а «1» записывается импульсом, перемагничивающим его до насыщения в противоположном направлении.

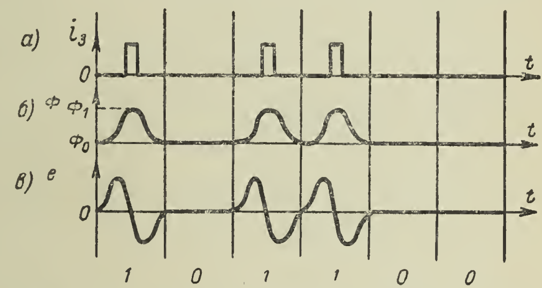


Рис. 4-4. Запись по двум уровням с промежутками.

Кривая *в* представляет собой изменения во времени э. д. с., наводимой в обмотке головки считывания информации с носителя. Эта э. д. с., очевидно, пропорциональна скорости изменения магнитного потока носителя:

$$e = k\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (4\text{-}1)$$

Поэтому каждому однополярному импульсу записи соответствует двухполярный импульс считывания, из которого в результате выпрямления, усиления и формирования можно получить однополярные кодовые импульсы прямоугольной формы нужной амплитуды.

Так как при записи по двум уровням используются только два состояния носителя, то одна из двух двоичных цифр (в нашем примере — «0») обязательно должна изображаться так же, как и отсутствие цифры. При этом не обеспечивается достаточная

надежность считывания данных, записанных с перекрытием, так как амплитуда сигналов считывания зависит от чередования кодовых импульсов. Лучшие результаты с этой точки зрения получаются при записи по трем уровням.

Запись по трем уровням с промежутками. Способ записи по трем уровням с промежутками иллюстрируется кривыми рис. 4-5. Запись информации здесь производится разнополярными импульсами тока $i_з$ (график *а*), в результате чего соответствующие участки предварительно размагниченного носителя ($\Phi_0 = 0$) намагничиваются до насыщения в том или ином направлении, причем поток в них достигает значений $+\Phi_1$ или $-\Phi_1$ (кривая *б*). Промежуткам между цифрами при этом соответствуют размагниченные участки носителя. Э. д. с. считывания, наводимая в обмотке головок, представляет собой разнополярные импульсы, получающиеся как при считывании нуля, так и при считывании единицы (кривая *в*). Разница заключается лишь в том, что при считывании «0» первый импульс э. д. с. — отрицательный, а второй — положительный, а при считывании «1» первый импульс — положительный, а второй — отрицательный. Для распознавания считанной информации можно воспользоваться одним из следующих способов.

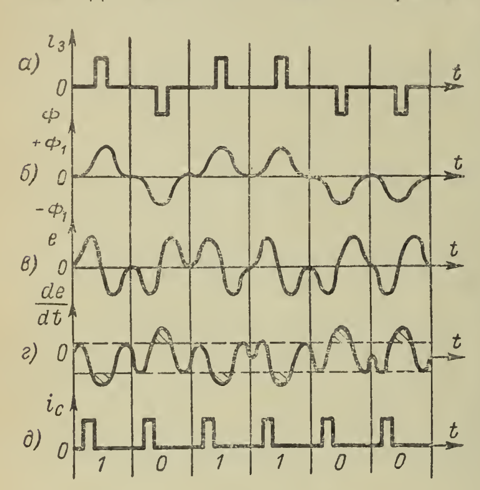


Рис. 4-5. Запись по трем уровням с промежутками.

Во-первых, можно подать считанные сигналы на дифференцирующую цепочку RC. Тогда на выходе последней будет получено напряжение, пропорциональное $\frac{de}{dt}$ (кривая *г*), с острыми отрицательными импульсами, соответствующими считанным единицам, и острыми положительными импульсами, соответствующими считанным нулям. Если пропустить далее это напряжение через двусторонний амплитудный ограничитель по максимуму (пределы ограничения показаны на рисунке пунктирными линиями), то на выходе ограничителя получатся импульсы (заштрихованные части на кривой *г*) положительные при считывании «0» и отрицательные при считывании «1».

Во-вторых, можно сигналы считывания с головки подать на схему совпадений вместе с последовательностью синхронизированных импульсов i_c (график *д*), которые расположены во времени так, что они всегда совпадают с первой половиной двухпо-

лярных сигналов считывания (график *в*). Тогда схема совпадений будет выдавать положительный импульс при считывании «1» и не будет выдавать импульса при считывании «0».

Запись по двум уровням без промежутков. Как указывалось выше, отличительной особенностью записи без промежутков является то, что переход носителя из одного магнитного состояния в другое соответствует не каждой отдельной двоичной цифре, а целым группам цифр, наделенным определенными признаками.

На рис. 4-6 изображен простейший и наиболее распространенный вариант записи по двум уровням без промежутков. В этом случае кодовые импульсы числа i (график *а*) не подаются непосредственно в обмотку записывающей головки, а используются для управления триггером, который под влиянием положительного импульса перебрасывается в рабочее состояние и выдает в обмотку головки положительный ток записи $i_з$, протекающий до тех пор, пока отрицательный кодовый импульс не перебросит триггер в начальное состояние. При этом через обмотку будет протекать отрицательный ток записи до новой переброски триггера положительным кодовым импульсом (график *б*). В результате перемагничивание носителя из первоначального состояния отрицательного насыщения $-\Phi_1$ в состояние положительного насыщения $+\Phi_1$ будет происходить при появлении положительного кодового импульса «1», а обратный переход из состояния $+\Phi_1$ в состояние $-\Phi_1$ — при появлении отрицательного кодового импульса (кривая *в*).

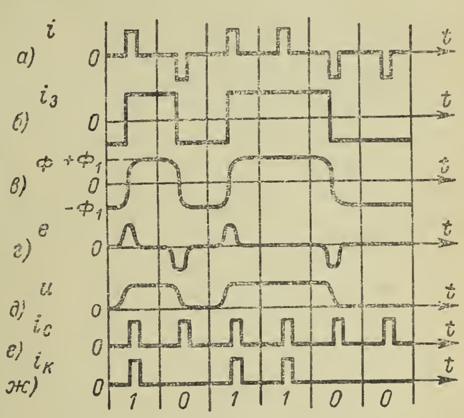


Рис. 4-6. Запись по двум уровням без промежутков.

При считывании информации импульсы э. д. с. e в обмотке магнитной головки индуктируются лишь при изменении магнитного потока носителя, т. е. когда мимо зазора проходит граница между участками носителя, намагниченными в разном направлении. При смене участка с потоком $-\Phi_1$ на $+\Phi_1$ индуктируется положительный импульс считывания, а при смене $+\Phi_1$ на $-\Phi_1$ — отрицательный импульс (кривая *г*). Таким образом, положительный импульс означает начало последовательности единиц, а отрицательный — начало последовательности нулей. Эти импульсы используются для управления триггером, напряжение на выходе которого представлено кривой *д*. Напряжение u, вырабатываемое триггером, подается на один из входов схемы совпадений, на другой вход подается последовательность синхронизированных

импульсов i_c (график *е*). В результате этого на выходе схемы совпадений получим последовательность импульсов (график *ж*), соответствующую коду числа, ранее записанного на данном участке носителя.

При применении описанного способа записи без промежутков между цифрами средняя частота импульсов в записывающей и считывающей головках при прочих равных условиях оказывается приблизительно вдвое ниже, чем при записи с промежутками. Это позволяет примерно вдвое увеличить плотность записи на носителе, т. е. в конечном счете вдвое увеличить емкость данного ЗУ и, соответственно, при той же скорости движения носителя вдвое повысить скорость записи и считывания информации. Следует отметить, что эти преимущества достигаются за счет усложнения схемы записи и считывания.

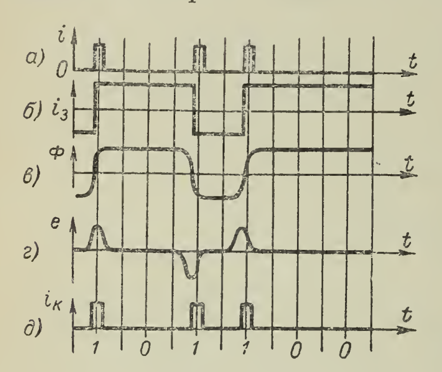


Рис. 4-7. Модифицированный способ записи по двум уровням без промежутков.

Требуется, например, двойное преобразование: при записи — для перехода от последовательности импульсов *а* к последовательности *б* и при считывании — от последовательности *г* к *е*.

Рассмотрим еще один вариант записи без промежутков. Его отличие от описанного выше заключается в том, что ток записи в обмотке головки $i_з$, а следовательно, и остаточный поток носителя $Ф$ изменяются каждый раз при записи «1» и остаются неизменными при записи «0» (рис. 4-7, *в*). Импульсы э. д. с. считывания (кривая *г*), имеющие разную полярность, преобразуются затем в однополярные прямоугольные импульсы $i_к$ (график *д*), представляющие код числа.

Описанный модифицированный способ обладает двумя важными преимуществами перед обычным способом записи без промежутков. Во-первых, схема считывания и расшифровки кода числа оказывается здесь значительно более простой (простое преобразование разнополярных импульсов *г* в однополярные *д*). Во-вторых, если заранее не было известно точное расположение информации, записанной на носителе, то при этом способе облегчается расшифровка считанных чисел. Так, например, при параллельной многодорожечной записи на магнитной ленте можно закодировать информацию таким образом, что в каждом поперечном ряду хотя бы на одной дорожке будет единица. По сигналам считывания можно определить местоположение этих единиц и использовать их как синхронизирующие импульсы, отказавшись от специального источника последних.

В заключение параграфа сформулируем основные требования, предъявляемые к формирователям сигналов записи и усилителям сигналов считывания в ЗУ с магнитной записью [4-3].

Электрические характеристики формирователей импульсов записи (усилителей мощности) определяются в основном полным входным сопротивлением магнитной головки, схемой ее включения и частотой следования импульсов записи. При этом желательно, чтобы форма импульса тока в обмотке головки была по возможности близка к прямоугольной. В качестве усилителей мощности применяют обычно усилители напряжения, реже — усилители тока.

Основным требованием, предъявляемым к усилителям считывания, является получение на выходе импульсов постоянной амплитуды при значительных колебаниях амплитуды и формы импульсов, поступающих на вход усилителя со считывающей обмотки магнитной головки. Изменения амплитуды и частоты следования входных сигналов, а также фазовые искажения их формы должны в минимальной степени сказываться на динамическом временно́м смещении выходных сигналов. Характеристики усилителя должны быть максимально стабильными при допустимых изменениях температуры окружающей среды и напряжения источников питания.

4-3. Магнитные головки

Для записи, считывания и стирания информации на магнитном носителе могут быть использованы самые разнообразные типы головок как с замкнутыми, так и с разомкнутыми магнитопроводами. Однако головки с незамкнутыми сердечниками характеризуются низкой эффективностью, вследствие чего в устройствах магнитной записи информации повсеместное применение получили так называемые кольцевые головки, имеющие замкнутый сердечник с небольшими зазорами.

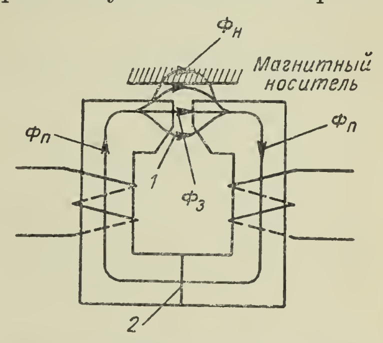


Рис. 4-8. Схематическое изображение магнитной головки с кольцевым сердечником и распределение в ней магнитных потоков при записи.

На рис. 4-8 схематически изображена головка с кольцевым сердечником и распределение в ней магнитных потоков при записи. Головка состоит из двух половин и имеет рабочий зазор *1*, обеспечивающий запись информации, и зазор *2*, который служит для уменьшения остаточного намагничивания сердечника. Ток, протекающий по обмотке головки, создает полный магнитный поток $\Phi_п$, силовые линии которого в месте разрыва (рабочего

зазора) разветвляются. Полезная часть потока ($Ф_н$) замыкается через магнитный носитель, вызывая его намагничивание, другая часть ($Ф_з$) представляет собой бесполезный поток, замыкающийся через зазор помимо магнитного носителя.

Наиболее важными вопросами при разработке конструкции магнитной головки являются следующие: а) выбор материала сердечника; б) конструктивное выполнение сердечника и зазоров в нем; в) выполнение катушки; г) рабочая поверхность головки. Рассмотрим последовательно перечисленные вопросы.

Выбор материала сердечника. Важнейшим показателем материала сердечников магнитных головок, обеспечивающим их высокую эффективность, является его высокая магнитная проницаемость по сравнению с проницаемостью носителя. Кроме того, для головок, работающих в запоминающих устройствах на магнитной ленте, касающейся головок и вызывающей при движении износ последних, существенным показателем является износоустойчивость материала головок.

Для изготовления головок используются различные магнитномягкие материалы и ферриты. При этом монолитные сердечники, например, из мягкого железа, применяются лишь на постоянном токе или на очень низких частотах (в головках для стирания постоянным током). При работе же на звуковых или высоких частотах и, в частности, при записи импульсов дискретной информации сердечники, для снижения потерь на вихревые токи, набирают из склеенных пластин толщиной от 15 до 100 *мкм*. Следует отметить, что хотя при уменьшении толщины пластин потери снижаются, но при этом уменьшается также и эффективное поперечное сечение из-за ухудшения коэффициента заполнения.

В настоящее время в качестве материала для изготовления сердечников чаще всего используются магнитномягкие сплавы: м у м е т а л л и п е р м а л л о й. Эти сплавы мягче магнитного покрытия из окиси железа, поэтому при больших скоростях движения ленты происходит быстрый износ головок. Естественно стремление к применению механически более твердых магнитномягких материалов, к которым, например, относится разработанный в США сплав а л ф е н о л.

В головках, предназначенных для записи и воспроизведения высоких частот, находят применение ферриты, обеспечивающие значительное снижение потерь на вихревые токи. Однако вследствие хрупкости феррита усложняется изготовление головок с небольшим по ширине рабочим зазором, ограниченным правильными плоскими гранями. Одним из решений этой проблемы является употребление ферритовых сердечников с полюсными наконечниками, изготовленными из другого магнитного материала с малым остаточным намагничиванием.

Свойства некоторых материалов, применяемых для изготовления сердечников, приведены в табл. 4-2 [4-1].

Материал	Магнитная проницаемость, *гн/м*		Коэрцитивная сила, *а/м*	Индукция насыщения, *тл*	Удельное сопротивление, *мком · см*
	начальная	максимальная			
Пермаллой 78	8 000	100 000	4	1,0	16
Муметалл	10 000	90 000	2	1,2	45
Алфенол	3 000	100 000	2	0,8	120
Феррит	2 000	4 000	24	0,4	107

Конструктивное выполнение сердечников и зазоров в них. Конструкция сердечника и, особенно, размеры и геометрическая форма границ рабочего зазора имеют исключительно важное значение для эффективности записи и считывания, а также получения необходимой конфигурации намагниченных участков на магнитном носителе. При записи рабочий зазор служит для создания потока рассеяния, намагничивающего магнитную ленту, а при считывании рабочим зазором определяется величина части потока ленты, замыкающегося через головку, а следовательно, и величина э. д. с. считывания.

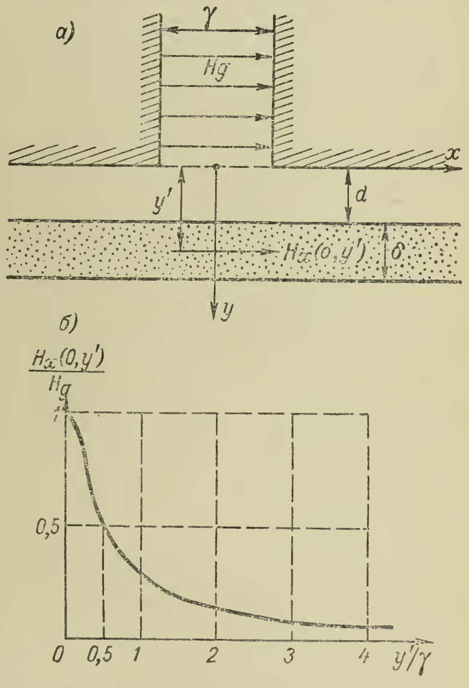


Рис. 4-9. Схематическое изображение зоны «щель головки — носитель» (*а*) и зависимость продольной составляющей напряженности поля в носителе от отношения y'/γ (*б*).

Для определения соотношения основных размеров в зоне «щель головки — носитель» рассмотрим рис. 4-9, *а*. Здесь: γ — ширина рабочего зазора; d — расстояние от головки до носителя; δ — толщина носителя; $y' = d + \delta/2$ — расстояние от магнитной головки до средней плоскости носителя; H_g — напряженность поля в зазоре головки; $H_x(0, y')$ — напряженность продольного намагничивающего поля в средней плоскости носителя под серединой зазора и головки. Величина этой напряженности достаточно точно

аппроксимируется выражением [4-11]:

$$H_x(0,\ y') = \frac{2H_g}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\gamma}{2y'}. \qquad (4\text{-}2)$$

Кривая, характеризующая отношение $H_x(0,\ y')/H_g$ в функции от y'/γ, представлена на рис. 4-9, *б*. Из графика этой функции видно, что при увеличении расстояния между головкой и носителем происходит быстрый спад поля рассеяния (записи). Поэтому целесообразно, чтобы величина y'/γ была не больше 2. Так как в ряде случаев, и особенно при применении жестких носителей (барабаны, диски), минимальное значение y' определяется зазором головка — носитель, то этот фактор ограничивает и величину зазора γ, и плотность записи.

Ширина рабочего зазора в записывающих и считывающих головках составляет обычно 5—20 *мкм*. Для того чтобы в процессе работы ширина щели не изменялась, а также для того, чтобы щель не засорялась грязью и, что особенно нежелательно, частицами ферромагнитного покрытия носителя, в щель закладывается прослойка в виде фольги из немагнитного материала, чаще всего сплавов меди. В высокочастотных головках для уменьшения потерь за счет вихревых токов целесообразно применение неметаллических прокладок. Например, в ферритовых головках для этой цели применяется слюда.

Так как изготовление фольги толщиной менее 5 *мкм* оказывается сложным, то иногда наносят прокладку путем электролиза или напыления. При записи на магнитной ленте с высокой плотностью ширина зазора γ уменьшается до 2—3 *мкм*, а иногда достигает и десятых долей микрона.

Выполнение катушки. Выполнение обмоток катушки определяется рабочим диапазоном частот, условиями согласования с другими частями схемы ЗУ, размерами сердечника и требованиями в отношении напряженности магнитного поля, которое должна создавать головка при записи, или величины требуемой э. д. с. при считывании.

В качестве примера приведем записывающе-считывающую двухканальную головку типа ДУМГ-1, используемую в ЗУ на магнитной ленте машины БЭСМ-2 [1-18]. Здесь в одном блоке совмещены две головки, разделенные магнитным экраном. Одна из них предназначена для записи и считывания синхронизирующих, а вторая — кодовых импульсов. Магнитопровод головок состоит из двух С-образных половин, изготовленных из магнитномягкого пермаллоя 80НХС. На каждой половине нанесена обмотка из 700 витков провода ПЭВ-2 сечением 0,1 *мм²*. Рабочий зазор головки — 20 *мкм* и задний зазор — 100 *мкм*. При таких параметрах головки и скорости движения ленты 2 *м/сек*, продольная плотность записи составляет 8 *имп/мм*, а амплитуда считываемого сигнала 30—40 *мв*.

Вообще амплитуда сигналов считывания в различных устройствах цифровой магнитной записи составляет от нескольких единиц до нескольких десятков милливольт, а величина токов записи в обмотках магнитных головок колеблется в пределах 10—80 *ма*.

В ряде случаев обмотки, расположенные на двух половинках сердечника магнитной головки, используются раздельно. Например, головка магнитного барабана машины БЭСМ-2 имеет две обмотки, одна из которых предназначена для записи нуля, а вторая — для записи единицы и для считывания. Обмотки намотаны так, что создают противоположно направленные м. д. с. Поэтому для записи информации можно использовать импульсы одной и той же полярности, подавая их в ту или другую обмотку. Для защиты от влияния внешних магнитных полей записывающие и считывающие головки экранируются, например, колпаками из металла с толщиной стенок 1—3 *мм*.

Рабочая поверхность головки. Для головок, работающих в ЗУ на магнитной ленте, весьма важное значение имеет состояние и длина рабочей поверхности головок, т. е. поверхности их соприкосновения с лентой. Этими факторами определяется износ головки, а от длины рабочей поверхности зависит также и эффективность работы головки.

Рабочая поверхность головок тщательно полируется так, что шероховатость ее для магнитномягких материалов характеризуется величиной примерно 0,1 *мкм*, а для ферритов — от 1 до 3 *мкм*. Износ головки и обусловленный им срок ее службы зависит от площади и длины рабочей поверхности, скорости движения ленты и угла охвата головки лентой, который рекомендуется допускать не более 30°.

Наряду с обычными конструкциями головок, заимствованными из техники магнитной записи звука, разработано значительное количество конструкций магнитных головок специального назначения. Например, для непосредственной печати результатов, записанных на магнитной ленте, последнюю нужно перемещать с очень малой скоростью (до 0,1—0,25 *м/сек*), что обусловливается низкой скоростью работы механических печатающих устройств. Для этой цели применяются специальные головки, чувствительные к величине магнитного потока. Выходное напряжение этих головок пропорционально величине магнитного потока и не зависит от скорости носителя, что делает возможным статическое считывание информации. Чаще всего в них используется принцип модуляции магнитным потоком носителя высокочастотного потока, намагничивающего до насыщения магнитопровод головки от специального генератора вспомогательной частоты. Частота этого тока возбуждения головки выбирается по крайней мере в 2—3 раза больше максимальной считываемой частоты.

Рабочий поток в головке, создаваемый полем рассеяния носителя, искажает симметричную форму кривой высокочастотного

потока возбуждения, и возникающие при этом четные гармоники напряжения вспомогательной частоты используются как мера величины рабочего потока. Поскольку рабочий поток значительно меньше потока возбуждения, амплитуда второй гармоники пропорциональна потоку, создаваемому намагниченностью носителя информации [4-18].

Головка, чувствительная к величине потока, позволила достичь плотности записи до 160 *имп/мм* при скорости движения ленты менее 10 *мм/сек*.

Магнитные головки, предназначенные для записи и считывания информации в ЗУ на магнитных барабанах и дисках, имеют ряд конструктивных особенностей. Во-первых, так как в этих ЗУ между головкой и магнитным носителем всегда имеется некоторый зазор, то в процессе эксплуатации не происходит износа головки, а само понятие рабочей поверхности головки становится беспредметным. Во-вторых, поскольку головки ЗУ на магнитных барабанах собираются в блоки по 10—50 и более штук, то для повышения поперечной плотности записи существенную роль получает максимальное уменьшение их размеров. Кроме того, возникает проблема снижения напряжения перекрестных наводок по отношению к напряжению считываемого сигнала. Для этой цели разработано большое количество конструкций специальных компактных головок.

Для решения сложной проблемы сохранения очень малого (порядка 10 *мкм* и менее) неизменного расстояния между головками и поверхностью магнитного барабана или диска предложено оригинальное решение в виде «плавающих в воздухе» магнитных головок.

При конструировании плавающих головок используются два принципа — аэростатический и аэродинамический.

В головках первого типа для создания воздушной подушки используется струя воздуха, который подается под давлением через специальные миниатюрные трубки, размещенные на блоке головок, в направлении магнитного носителя. Благодаря этому между головкой и движущимися или неподвижными носителями выдерживается постоянный зазор порядка 10—12 *мкм*. Однако недостатком аэростатических головок является сложность и дороговизна конструкции, а также необходимость использования специальных фильтров для очистки воздуха во избежание засорения воздуходувных трубок и оседания пыли на головках и носителе.

Более проста и экономична конструкция головок, основанных на аэродинамическом принципе. Эти головки, называемые также глиссирующими, удерживаются на расстоянии 5—10 *мкм* от поверхности носителя за счет подъемной силы, поддерживающей плавающий башмак с головками благодаря попаданию под башмак воздуха, увлекаемого быстро движущимся носителем. Естественно, что аэродинамические головки начинают плавать только при достижении носителем некоторой критической скорости,

и поэтому, во избежание повреждения ферромагнитного слоя, перед остановкой и при пуске барабана и дисков блок головок нужно отводить. Однако, несмотря на этот недостаток, аэродинамические головки широко используются в современных ЗУ.

4-4. Запоминающие устройства на магнитной ленте

Накопители на магнитной ленте нашли исключительно широкое применение в вычислительной технике и технике автоматизации. В частности эти ЗУ применяются в очень многих электронных машинах в качестве внешних накопителей информации большой емкости, а в ряде случаев и в качестве быстродействующих устройств ввода данных в машину.

Магнитные ленты, используемые в вычислительной технике, как и применяемые в технике звукозаписи, представляют собой основу из пластмассы (ацетилцеллюлозы, триацетата, поливинилхлорида) или фосфористой бронзы, на которую нанесен слой магнитного покрытия, являющегося собственно носителем информации.

Толщина получивших наиболее широкое применение пластмассовых лент составляет 40—60 *мкм*, а толщина покрытия 10—20 *мкм*.

Важными механическими параметрами пластмассовых лент являются: прочность на разрыв, имеющая величину порядка 10—14 $кГ/мм^2$; допустимая величина упругого растяжения, которая не должна превышать 1%; пластическое удлинение (деформация) ленты, которое должно быть не более 0,15%.

Ширина применяемых в вычислительной технике лент колеблется в пределах от 6,35 *мм* (стандартной ширины магнитофонной ленты) с записью на 1—3 дорожках, до 355,6 *мм* с записью на 128 дорожках. Впрочем, ленты шириной более 35 *мм* применяются редко, так как при этом усложняется конструкция блока магнитных головок и регулировка лентопротяжного механизма, а также возникают перекосы ленты при ее протягивании, требующие во избежание ошибок уменьшения плотности записи.

Стандартная фабричная длина магнитных лент в рулоне составляет 125, 250, 500 и 1000 *м*.

Наиболее частыми и опасными дефектами лент являются дефекты магнитного носителя, которые, будучи необнаруженными, могут привести к сбоям работы ЗУ. Поэтому перед употреблением лента должна быть подвергнута проверке с целью исключения возможности записи на дефектных участках носителя.

Эффективная система проверки многодорожечных лент заключается в следующем. На специальной синхронизирующей дорожке ленты записываются импульсы, равномерно распределенные во времени. Затем эти импульсы считываются и перезаписываются на первую рабочую дорожку. Если на синхронизирующей дорожке был дефектный участок, не обеспечивающий получения

достаточного по амплитуде импульса считывания, то этот импульс не будет записан на соответствующем участке первой рабочей дорожки. Таким же образом происходит перезапись импульсов с первой на вторую рабочую дорожку, со второй на третью и так далее до последней рабочей дорожки. После этого записанные ранее на синхронизирующую дорожку импульсы стираются и на нее перезаписываются импульсы с последней дорожки. Затем, в процессе эксплуатации, для записи информации используются только те поперечные сечения ленты, которые расположены против импульсов, записанных на синхронизирующую дорожку. Таким образом, полностью исключается использование дефектных участков ленты.

Еще одной возможной причиной ошибок работы ЗУ на магнитной ленте может служить явление, получившее название копирэффекта, т. е. «пропечатывания» записи на соседних витках ленты, намотанной в рулон. При достаточно интенсивной намагниченности элементарных участков ленты создаваемое ими магнитное поле может проникать в соседние витки и создавать новые намагниченные зоны, которые при считывании создадут ложные сигналы, опережающие основной полезный сигнал или отстающие от него.

Появлению копирэффекта способствует воздействие на ленту внешнего переменного магнитного поля. Борьба с явлением копирэффекта заключается в ограничении интенсивности намагничивания ленты при записи импульсов и предохранении ее от воздействия переменных магнитных полей при хранении.

Основные параметры четырех типов магнитных лент сведены в табл. 4-3 [4-9].

Таблица 4-3

Тип ленты	Толщина ленты, *мкм*	Толщина магнитного слоя, *мкм*	Остаточная индукция B_r, *мтл*	Коэрцитивная сила H_c, *а/см*
1 (СССР)	60	15	25	80
2 (СССР)	50	15	50	160
С фирмы АГФА (ГДР)	50	15	25	80
СН фирмы АГФА (ГДР)	50	15	50	160

Запись и считывание информации с ленты производятся обычно группами чисел, которые размещаются на участках ленты, называемых зонами. Каждой зоне присваивается определенный номер (код номера группы). Например, в ЗУ на магнитной ленте машины БЭСМ-2 (рис. 4-10) шириной 6,35 *мм* в зоне может быть записано до 2048 двоичных 39-разрядных двоичных чисел. Между отдельными зонами оставляются промежутки, необходимые для разгона и остановки ленты, которые называются интервалами или пробелами. Длина интервалов на ленте достигает 10—15 *см*.

Запись и считывание информации производятся со средней скоростью порядка нескольких тысяч или десятков тысяч двоичных знаков в секунду. В наиболее совершенных ЗУ на магнитной ленте эта скорость достигает 200—300 тысяч двоичных знаков в секунду.

Одной из существенных проблем, возникающих в связи с разработкой ЗУ на магнитной ленте, является конструирование соответствующих механизмов для продвижения ленты. Лентопротяжный механизм должен обеспечивать высокую скорость продвижения ленты при быстром наборе скорости в начале перемещения ленты и быстрой остановке движения ленты. Медленный разгон и торможение ленты затрудняют считывание информации в начале и конце зон и заставляют делать большие промежутки между

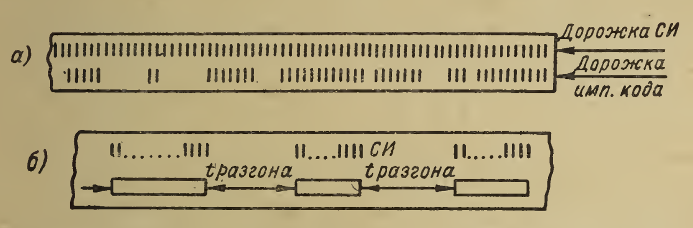


Рис. 4-10. Схема размещения на магнитной ленте машины БЭСМ-2: *а* — синхронизирующих и кодовых импульсов; *б* — групп кодов.

зонами, что приводит к нерациональному использованию носителя. Кроме того, лентопротяжный механизм должен обеспечивать постоянную скорость перемещения ленты и наличие контакта магнитной ленты с головками, так как от этих факторов зависит амплитуда сигнала считывания. Наконец, очень важна точная регулировка механизма, которая обеспечивала бы достаточно высокую скорость перемещения ленты, достигающую в некоторых случаях 2—6 *м/сек*, без ее смещений, изгибов и перекосов.

Наиболее широкое применение получили лентопротяжные механизмы с двумя бобинами, с одной из которых лента сматывается, а на другую наматывается. Упрощенная кинематическая схема подобного лентопротяжного механизма приведена на рис. 4-11. В зависимости от направления движения магнитная лента *1* сматывается с одной из двух бобин *2* и наматывается на другую из них. Бобины приводятся во вращение электродвигателем через ременные передачи и порошковые электромагнитные муфты, обеспечивающие быструю остановку и реверс бобин (эта часть механизма на рисунке не показана). Движение ленты обеспечивается вращением в соответствующих направлениях ведущих лентопротяжных роликов *3*, приводимых в движение другим электродвигателем. Все стрелки на рис. 4-11 соответствуют перемотке ленты с левой бобины на правую.

Управление срабатыванием электромагнитных муфт, т. е. приведением в движение той или иной из бобин, осуществляется пневмореле *6* и *7*, расположенными в карманах *5*. Пневмореле *8* является аварийным. Размеры карманов, имеющих прямоугольное сечение, подобраны так, что лента, провисающая в них в виде компенсационных петель, почти полностью перекрывает сечение карманов. Воздушный насос *9* создает вакуум в нижней части карманов. При отсутствии записи-считывания компенсационные петли разделяют в обоих карманах реле *6* и *7*, так что реле *7* находится в вакууме и, посылая ток в тормозные муфты, стопорят бобины *2*. При направлении движения ленты, показаном на рис. 4-11, левая петля ленты поднимается выше реле *6*, а правая опустится ниже реле *7*. Тогда происходит, во-первых, расстопоривание бобины, во-вторых, левое реле *6* под действием вакуума обеспечит через соответствующую электромагнитную муфту сцепление левой бобины с приводом и вращение ее по часовой стрелке, в-третьих, правое реле *7* под давлением воздуха обеспечит через другую электромагнитную муфту сцепление правой бобины с приводом и вращение ее также по часовой стрелке. Вращение бобин происходит до тех пор, пока петли не займут положение между реле *6* и *7*. Затем бобины останавливаются, но, если продвижение ленты роликами *3* продолжается, длина петель вновь изменяется, и бобины *2* опять под управлением пневмореле *6* и *7* приводятся во вращение. Таким образом, даже при одностороннем равномерном движении ленты в зоне блока головок *4*, вращение бобин *2* носит пульсирующий характер.

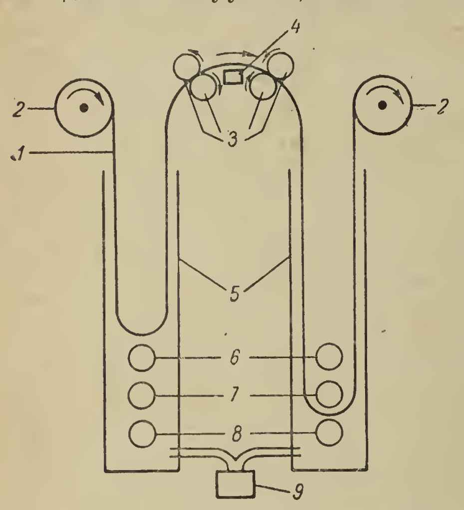


Рис. 4-11. Упрощенная кинематическая схема лентопротяжного механизма.

1 — лента; *2* — бобины; *3* — ведущие лентопротяжные ролики; *4* — блок магнитных головок; *5* — карманы; *6* и *7* — управляющие пневмореле; *8* — аварийные пневмореле; *9* — воздушный насос.

В других конструкциях лентопротяжных механизмов для управления вращением бобин в зависимости от длины компенсационных петель вместо пневмореле применяются фотоэлементы. Например, в [4-4] описан лентопротяжный механизм с фотореле для ЗУ большой емкости. Его технические данные: емкость более 82 млн. *бит* (дублированных) на ленте шириной 35 *мм* и длиной 500 *м*; максимальная длина ленты, которая может быть установлена в механизме, 1500 *м* (при этом емкость повышается до

247 млн. *бит*); скорость записи-считывания 200 тыс. *бит/сек*; время пуска-остановки 15 *мсек.* продольная плотность записи $p_л = 15$ *бит/мм*; поперечная плотность $p_п = 0{,}63$ *дор/мм* (на ленте шириной 35 *мм* располагается 22, т. е. 11 дублированных дорожек); габариты 1800×500×640 *мм*; вес 250 *кг*.

Существуют также безбобинные лентопротяжные механизмы, в которых по обе стороны магнитных головок имеются по две пары роликов — по одному непрерывно вращающемуся ведущему ролику и одному прижимному ролику, управляемому соленоидом. Лента свободно лежит на ведущем ролике и начинает двигаться, когда к нему прижимается прижимной ролик. При движении лента свободно падает змейкой с лентопротяжных роликов в специальные узкие карманы, образованные двумя пластинами, отстоящими друг от друга на расстоянии, несколько бо́льшем ширины ленты.

Запоминающие устройства на магнитной ленте обладают весьма значительными достоинствами: а) при условии смены бобин с лентой они имеют практически неограниченную емкость; б) это самые экономичные из всех существующих ЗУ — стоимость хранения одного бита в ЗУ на магнитной ленте самая низкая; в) они исключительно компактны, устойчивы в работе и достаточно надежны.

Основным недостатком ЗУ на магнитной ленте является относительно большое время обращения (порядка долей минуты и даже нескольких минут), что обусловлено необходимостью перемотки ленты для отыскания нужной зоны. Нежелательным свойством их является также наличие механического перемещения ленты и связанная с этим возможность ее обрывов и других механических повреждений.

4-5. Запоминающие устройства на магнитных барабанах

Значительного снижения времени обращения к ЗУ с магнитной записью можно добиться, применяя в качестве носителя информации вместо ленты магнитный барабан (рис. 4-12). Барабан представляет собой непрерывно вращаемый электродвигателем цилиндр из немагнитного материала (латуни, алюминия или его сплавов), с ферромагнитным покрытием толщиной 10—100 *мкм*. Иногда основа цилиндра изготовляется из стали и покрывается сперва латунью, а затем уже ферромагнитным слоем. В простейшем случае магнитные головки могут располагаться в один ряд вдоль образующей барабана. Таким образом, при вращении барабана может производиться параллельная запись или считывание числа, которое содержит столько двоичных разрядов, сколько имеется в ряду

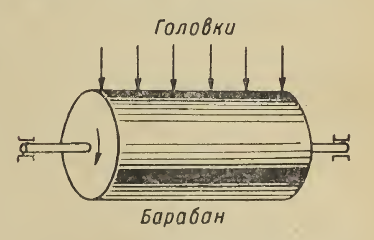


Рис. 4-12. Схематическая конструкция запоминающего устройства на магнитном барабане.

головок. Дорожки на барабане представляют собой замкнутые параллельные окружности.

Большая скорость работы ЗУ на магнитных барабанах обусловлена значительно бóльшей линейной скоростью его поверхности, достигающей нескольких десятков, а частью и сотен метров в секунду по сравнению с максимальной практически скоростью ленты 3—6 *м/сек*. Однако уменьшение времени обращения и повышение скорости записи и считывания информации в ЗУ на магнитных барабанах связано с существенными ограничениями их емкости и ухудшением компактности ЗУ. В самом деле, емкость ЗУ ограничивается площадью поверхности барабана, а изготовление барабанов большой длины и диаметра весьма затруднительно вследствие очень высоких требований к точности их размеров и недопустимости температурных и механических деформаций из-за возможности повреждения ферромагнитного слоя барабана головками, которые располагаются на расстоянии 20—50 *мкм* от его поверхности (плавающие головки могут располагаться на расстоянии 5—15 *мкм* от поверхности барабана).

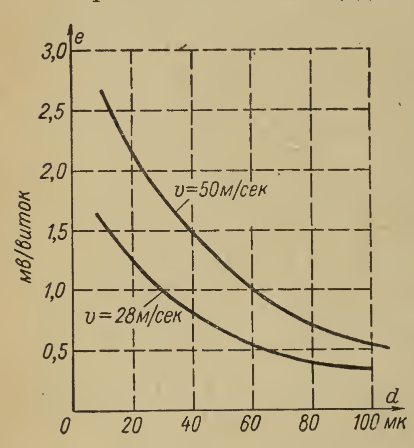


Рис. 4-13. Зависимость э. д. с. считывания от зазора между головкой и носителем для двух значений окружной скорости барабана.

В процессе работы ЗУ должно соблюдаться максимальное постоянство этого расстояния, так как от него существенно зависит интенсивность намагничивания носителя при записи и амплитуда сигналов считывания.

На рис. 4-13, например, приведены графики зависимости э. д. с. считывания e от расстояния d между головкой и поверхностью магнитного барабана. Эти кривые сняты для магнитного покрытия типа ИЗ-257 (см. табл. 4-1) и головки шириной 2 *мм* с сердечником из пермаллоя 80НХС с зазорами 5 и 30 *мкм* [4-10].

Практически расстояние d поддерживать постоянным очень трудно по ряду причин. Здесь сказывается непрямолинейность образующих барабана (отклонения порядка ±5 *мкм*), неравномерность толщины ферромагнитного покрытия (±5 *мкм*), непрямолинейность рабочей поверхности блока головок (±3 *мкм*), биения в подшипниках (±3—5 *мкм*), эксцентриситет барабана (±3—5 *мкм*).

Для снижения влияния всех этих факторов требуется исключительная точность механической обработки и сборки всего агрегата, высокая жесткость конструкции барабана и станины, тщательная юстировка блока головок, применение мер для компенсации температурных изменений и т. д. Для уменьшения относи-

тельного влияния той или иной величины приходится увеличивать величину расстояния между головками и поверхностью до 20—30 *мкм*. Правда, при этом уменьшается эффективность записи и считывания и снижается допустимая линейная и поперечная плотность записи.

На рис. 4-14 приведена графическая зависимость продольного размера l немагнитного диполя («отпечатка») на поверхности барабана от расстояния d между поверхностью барабана и головкой с рабочей щелью 40 *мкм*.

Увеличения амплитуды сигнала считывания можно достигнуть повышением скорости вращения барабана, которая в настоящее время в различных устройствах колеблется в пределах от 600 до 20 000 *об/мин*, достигая в редких случаях 70 000 и даже 100 000 *об/мин*. Ускорение вращения барабана выгодно с точки зрения уменьшения максимального времени обращения, равного в простейшем случае времени одного полного оборота. Впрочем, для уменьшения времени обращения возможно увеличение количества головок на каждой дорожке и применение соответствующей электронной коммутации этих головок со входами и выходами ЗУ. Так, при наличии четырех комплектов головок, расположенных через каждые 90°, время обращения будет снижено до одной четверти времени полного оборота барабана.

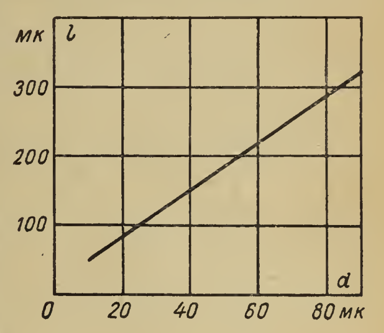


Рис. 4-14. Зависимость продольного размера отпечатка l от расстояния d между головкой и поверхностью магнитного барабана.

Продольная плотность записи на барабанах обычно не превышает 4—6 *имп/мм*, а поперечная — 4—8 *дорожек/см*, хотя в некоторых конструкциях достигнута поперечная плотность 10 *дорожек/см*. Этот показатель лимитируется трудностями создания очень узких (толщиной менее 1 *мм*) головок и возможностью ложного считывания за счет влияния поля соседних дорожек.

Общее количество информации M, которое может быть записано на магнитном барабане, определяется в первую очередь его размерами и может быть оценено выражением [4-10]:

$$M = \frac{(0,90 \div 0,97)\,\pi D l}{b + (0,5 \div 1)}\, p_л \ [бит], \qquad (4\text{-}3)$$

где D — диаметр барабана, *мм*; l — длина барабана, *мм*; b — толщина сердечника головки, *мм*; $p_л$ — линейная (продольная) плотность записи, *имп/мм*.

Коэффициент 0,90—0,97 учитывает интервалы между группами чисел, а величина 0,5—1 *мм* представляет расстояние между

дорожками, необходимое для устранения взаимного влияния соседних дорожек.

Магнитные барабаны находят весьма широкое применение в вычислительной технике в качестве внешних или промежуточных ЗУ быстродействующих цифровых машин. В связи с этим имеется большое число различных конструкций магнитных барабанов. Технические характеристики некоторых из них приведены в табл. 4-4.

Таблица 4-4

Тип машины	Емкость, тыс. *бит*	Диаметр барабана, *мм*	Длина барабана, *мм*	Скорость вращения, *об/мин*	Продольная плотность $p_д$, *имп/мм*	Поперечная плотность $p_п$, *дор/мм*	Максимальное время ожидания, *мсек*	Частота повторения импульсов, *кгц*
БЭСМ-2 (СССР)	246	350	370	750	—	—	—	—
Урал-2 (СССР)	—	350	—	1 500	3	—	—	—
Сперри Джироскоп (Англия)	1000	300	250	1 500	4	1	—	93
Ферранти (Англия) . . .	448	340	430	3 472	3,2	0,3	—	200
Бритиш Табулейшн (Англия)	1500	380	355	180	40	0,9	365	150
Ремингтон Рэнд (США) тип 1120	256	110	380	12 000	3,1	0,63	5	220
Ремингтон Рэнд (США) тип 1110	2552	560	730	1 190	3,1	0,63	51	110

Емкость ЗУ на одном магнитном барабане колеблется обычно в пределах от 5000 до 400 000 *бит*, достигая в отдельных экспериментальных образцах 1,5—2 млн. *бит*. В случае необходимости значительного увеличения емкости ЗУ можно применить в нем не один, а несколько барабанов. Существуют ЗУ подобного типа, в которых работают параллельно до 20 магнитных барабанов.

Так как мельчайшие частицы, попадая в зазор между головками и поверхностью барабана, могут привести к появлению царапин на ферромагнитном покрытии, то барабан вместе с блоком головок рекомендуется помещать в герметизированном кожухе. Иногда в шкаф, где располагается барабан, воздух подается после очистки в масляном фильтре. В некоторых случаях барабаны, особенно работающие на очень высоких скоростях, помещают в контейнер, в котором создается вакуум. В различных конструкциях барабаны устанавливаются либо в горизонтальном, либо в вертикальном положении.

Подобно ЗУ на магнитных лентах, в ЗУ на барабанах существуют два способа отыскания ячейки по заданному адресу.

Один из способов, применяемый относительно редко, заключается в том, что нужная ячейка находится путем считывания и сличения кодов контрольных номеров, записанных на образую-

щих барабана с заданным адресом. При совпадении их происходит подключение блока головок к схемам записи или считывания.

Другой способ, получивший наиболее широкое распространение, заключается в том, что адрес определяется регистрацией позиций барабана по окружности путем подсчета специальных синхронизирующих или маркерных импульсов от некоторого фиксированного положения которому, в свою очередь, соответствует особый маркерный импульс. После считывания записанная на барабане информация не стирается, а при записи в данной

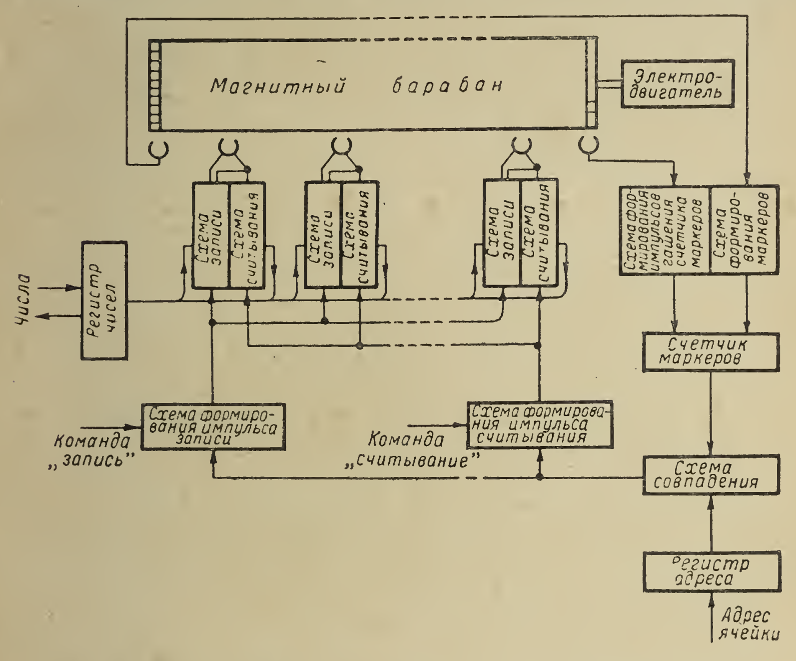


Рис. 4-15. Упрощенная блок-схема ЗУ на магнитном барабане.

ячейке нового числа оно просто заменяет число, хранившееся в этой ячейке ранее.

Все n записывающе-считывающих головок (см. рис. 4-15), укрепленных на общей консоли вдоль барабана, при вращении последнего всегда расположены вдоль одной из его образующих. Таким образом, все n-разрядное число записывается на одной из N образующих барабана, каждой из которых присвоен один из N адресов.

На отдельной маркерной дорожке барабана (на рисунке слева) записаны маркерные отметки — по одной против каждой образующей, соответствующей одной ячейке ЗУ. При вращении барабана маркерные импульсы непрерывно считываются специальной головкой и подаются в схему формирования маркеров, откуда в свою очередь поступают на вход счетчика маркеров. Таким

образом, счетчик указывает номер образующей, т. е. адрес ячейки ЗУ, которая проходит в данный момент под блоком магнитных головок. Кроме того, один раз за каждый оборот барабана, в промежутке между N-ым и 1-ым маркерными импульсами, другая головка считывает с еще одной отдельной дорожки (на рисунке справа) одиночный маркерный импульс, который и подается на вход гашения счетчика через соответствующую схему формирования.

Рассмотрим теперь процессы записи и считывания чисел в ЗУ на барабане. Число, подлежащее записи, поступает из схемы машины и фиксируется в регистре чисел, а адрес ячейки, в которой число должно быть записано, — в регистре адреса. Триггер каждого разряда регистра соединен с соответствующими схемами (усилителями) записи и чтения, а последние, в свою очередь, связаны с магнитными головками соответствующих разрядов.

При поступлении на схему формирования импульсов записи команды «запись» эта схема оказывается подготовленной к выдаче импульса во все n схем записи. Однако выдача этого импульса происходит лишь при совпадении адресов, зафиксированных в счетчике маркеров и регистре адреса, т. е. в момент, когда нужная ячейка находится под блоком магнитных головок. При этом схема совпадений выдает импульс в схемы формирования импульсов записи и чтения, но далее срабатывает только подготовленная командой «запись» схема формирования импульсов записи, которая и выдает импульс во все схемы записи. Эти схемы, в свою очередь, создают тракты для записи магнитными головками всех разрядов числа, зафиксированного в регистре чисел. Для этого в зависимости от состояния, в котором находится каждый из триггеров регистра чисел («0» или «1»), соответствующая схема записи направляет импульс записи в одну или другую обмотку магнитной головки, обеспечивая намагничивание в том или другом направлении элемента магнитной поверхности, который находится под головкой.

При считывании числа из ЗУ в регистр адреса помещается адрес ячейки подлежащей считыванию, а командой «чтение» подготовляется к выдаче импульса схема формирования импульсов чтения. Далее, при совпадении адресов, зафиксированных в счетчике маркеров и в регистре адреса, схема формирования импульсов чтения выдает импульсы, открывающие одновременно все n схем чтения. При этом они пропускают импульсы, индуктированные в обмотках магнитных головок, к соответствующим триггерам регистра чисел, в котором фиксируется число, считанное из избранной ячейки магнитного барабана.

Аналогичный принцип управления записью и считыванием применяется как в других схемах ЗУ на магнитных барабанах, так и в ЗУ на магнитной ленте. Однако специфической особенностью последних является необходимость управлять в соответствии с заданным адресом ячейки перемоткой ленты до нахожде-

ния нужной зоны. ЗУ на магнитных барабанах характеризуются высокой экономичностью (наряду с магнитной лентой это самые дешевые ЗУ), надежностью и простотой эксплуатации, относительной компактностью (впрочем, значительно меньшей, чем у ЗУ на магнитной ленте, так как внутреннее пространство барабана остается неиспользованным) и устойчивостью.

Описываемые ЗУ не свободны и от ряда недостатков, к которым относятся: ограниченная по сравнению с магнитными лентами емкость, наличие механического вращательного движения, относительно большое среднее время вращения (порядка единиц — десятков миллисекунд), определяемое временем одного оборота, хотя это время и значительно меньше времени обращения к ЗУ на магнитной ленте.

4-6. Запоминающие устройства на лентобарабане и магнитных дисках

Интересным решением вопроса о создании магнитного ЗУ с емкостью, во много раз превышающей емкости магнитных барабанов, и в то же время характеризующегося значительно ме́ньшим временем обращения, чем у ЗУ на магнитной ленте, является комбинированное ЗУ лентобарабанного типа.

В этом устройстве, разработанном американской фирмой «Клевит-браш девелопмент», запись информации производится на магнитную ленту шириной до 300 *мм* и длиной от 3 до 200 *м*, на которой размещаются 128 параллельных дорожек. Магнитные головки (128 шт.) располагаются в ряд на непрерывно вращающемся со скоростью 1200 *об/мин* немагнитном барабане с диаметром 305 *мм*, который огибается по полуокружности лентой (рис. 4-16). Участок ленты, равный длине полуокружности барабана, т. е. около 480 *мм*, называется страницей. Очевидно, что за один оборот барабана может быть записана или считана вся информация, размещающаяся на одной странице, т. е. около 200 000 *бит*. Общая емкость описанного ЗУ достигает 100 млн. *бит*.

Другим решением вопроса об увеличении емкости ЗУ с магнитной записью при небольшом времени обращения является разработанное фирмой ИБМ запоминающее устройство на магнитных дисках, впервые примененное в 1956 г. в машине РАМАК [4-9]. В этом ЗУ информация записывается на 50 магнитных дисках, подобных граммофонным пластинкам (рис. 4-17). Они насажены на общую ось, которая непрерывно вращается со скоростью 1200 *об/мин*. Диски изготовлены из алюминия с ферромагнитным покрытием. Диаметр диска составляет около 610 *мм*, толщина равна 2,54 *мм* и расстояние между дисками 7,62 *мм*.

Запись производится на обеих сторонах диска. На одной стороне располагается 100 концентрических дорожек, на каждой из которых может быть записано 4000 *бит*. Таким образом, емкость

всего устройства составляет 40 млн. *бит* при следующих габаритах дискового комплекта: диаметр 610 *мм*, высота 508 *мм*. Для сравнения укажем, что для реализации такой же емкости при той же плотности записи потребовался бы магнитный барабан диаметром 330 *мм* и длиной около 13 *м*, т. е. в семь раз больше по объему.

Запись и считывание информации в описываемом ЗУ производятся двумя магнитными головками, смонтированными на паре рычагов, которые в свою очередь укреплены на каретке, перемещающейся по вертикальной направляющей планке, как это показано на рис. 4-17. Вертикальное перемещение каретки для выбора нужного диска и последующее горизонтальное перемещение

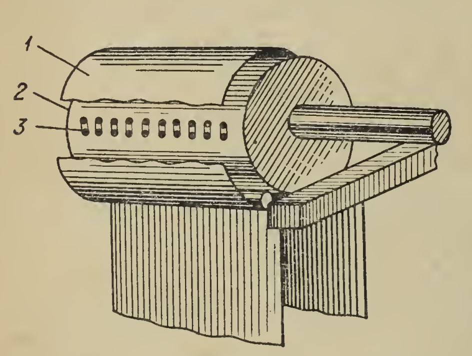


Рис. 4-16. Схематическое устройство лентобарабана.

1 — магнитная лента; 2 — вращающийся барабан; 3 — магнитные головки.

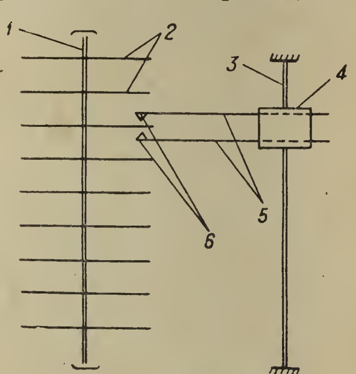


Рис. 4-17. Схематическая конструкция ЗУ на магнитных дисках.

1 — ось; 2 — магнитные диски; 3 — направляющая планка; 4 — каретка; 5 — рычаги; 6 — магнитные головки.

рычагов в каретке для выбора требуемой дорожки осуществляются электродвигателем, а избранные положения фиксируются защелками с пневматическим управлением.

В устройстве применены магнитные головки, плавающие на воздушной подушке. Наибольшее время, необходимое для перемещения головок, не превышает 0,75 *сек*. Среднее время обращения к любой ячейке ЗУ с общей емкостью 40 млн. *бит* менее 0,5 *сек*, что является весьма хорошим показателем по сравнению с ЗУ на магнитной ленте. Время обращения может быть еще несколько снижено посредством установки нескольких механизмов с магнитными головками.

За истекшее десятилетие зарубежными фирмами разработано большое количество значительно более совершенных ЗУ на магнитных дисках, которые получили широкое распространение в вычислительных машинах США, Англии, ФРГ и некоторых других стран. Общее представление о состоянии дисковых ЗУ можно составить из табл. 4-5, где приведены данные о нескольких типах этих устройств.

Таблица 4-5

Тип ЗУ и фирма	Емкость, *мегабит*	Количество дисков в блоке, шт.	Максимальное время обращения, *мсек*	Частота повторения импульсов, *кгц*
МДМ-12 (Компютер асесориз, США)	17	—	35	1000
1900 (ИСТ, Англия)	100—419	6, 13, 25	150	—
В-500 (Бюрроуз, США)	9,6—960	4	40	75
1311 (ИБМ, США)	2—14	6	400	777
1301 (ИБМ, США)	28—280	20	180	75
1302 (ИБМ, США)	117—1200	20	180	184
4000-2 (Брайан компютер продактс, (США)	До 3800	6, 13, 25	200	—

Скорость вращения дисков в большинстве ЗУ составляет от 1500 до 3000 *об/мин*. Плотность записи в одном и том же ЗУ переменна в зависимости от радиуса дорожки. Весьма высокой плотностью записи характеризуется ЗУ 4000-2А, в котором продольная плотность достигает 32 *имп/мм*, а поперечная — 5,4 *дорожек/мм*.

В заключение следует отметить, что несмотря на существенный прогресс, достигнутый в технике цифровой магнитной записи за последние десять — пятнадцать лет, все еще имеются значительные резервы их дальнейшего совершенствования. Это позволяет утверждать, что в качестве внешней памяти большой и сверхбольшой емкости ЗУ с магнитной записью, как самые компактные, экономичные и надежные, сохранят свои основные ведущие позиции и в дальнейшем, по крайней мере в течение ближайших десяти лет.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ФЕРРОМАГНИТНЫЕ СЕРДЕЧНИКИ КАК ЗАПОМИНАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

5-1. Общие сведения о ферромагнитных сердечниках и принципах их работы в качестве запоминающих элементов

Наиболее удачного сочетания надежности, быстродействия, экономичности, небольших габаритов и технологичности изготовления удалось добиться в течение последних десяти — пятнадцати лет в результате разработки различных типов ЗУ, в которых используются ферромагнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). Такое условное определение класса ферромагнитных материалов употребляется в связи с тем, что процессы перемагничивания в них характеризуются петлей гистерезиса, форма которой более или менее близка к прямоугольной.

Эти материалы могут быть подразделены на две большие группы — ферриты, являющиеся диэлектриками с ферромагнитными свойствами, и текстурованные ферромагнитные сплавы, применяемые в виде тонких лент толщиной порядка единиц-десятков микрон.

Повсеместное распространение в настоящее время получили запоминающие элементы на ферритах с прямоугольной петлей гистерезиса.

Ферриты, или оксиферы, представляют собой комплексные металлические окислы (соли твердой кислоты), имеющие общую химическую формулу вида $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Ме — тот или иной двухвалентный металл. Для изготовления сердечников ЗУ широкое применение получили характеризующиеся прямоугольной петлей гистерезиса магний-марганцевые ферриты, составленные по формуле $MgO \cdot MnO \cdot Fe_2O_3$.

Разработаны также ферриты других составов, обладающие некоторыми улучшенными параметрами — никелевые, медно-марганцевые и др.

Весьма высокой температурной стабильностью характеризуются литийсодержащие ферриты, разработке которых за последние годы уделялось серьезное внимание [5-50].

Ферритовые сердечники характеризуются тремя основными размерами: наружным диаметром D, внутренним диаметром d и высотой h.

В табл. 5-1 приведены типовые размеры ферритовых сердечников с ППГ [5-20].

Таблица 5-1

Размеры, *мм*			Размеры, *мм*		
D	d	h	D	d	h
0,6	0,4	0,2	3,0	2,2	1,0
0,8	0,6	0,25	4,0	2,5	1,2—1,5
1,0	0,7	0,35	4,0	2,8	1,2—1,3
1,2	0,8	0,35 (0,25)	5,0	3,0	1,5
1,4	1,0	0,6	7,0	4,0	2,0
2,0	1,3	0,7	7,0	5,0	2,0—3,0
2,0	1,4	0,8—1,0	8,0	6,0	2,0
2,4	1,8	0,6	10,0	6,0	2,0—4,0
3,0	2,0	1,2—1,4			

На размеры сердечников в соответствии с нормалью НО.707.000 установлены допуски: на внешний (D) и внутренний (d) диаметры $\pm 3 \div 4\%$ и на высоту (h) $\pm 7 \div 10\%$.

За последние годы разработаны и начинают применяться в машинах еще более миниатюрные сердечники с внешним диаметром 0,5 *мм* и внутренним 0,33 *мм* и даже с внешним диаметром 0,3 *мм* и внутренним 0,18 *мм* [1-14]. Наконец, сообщается о раз-

работке в лаборатории фирмы «Денеско» (США) сердечников с наружным диаметром 0,13 *мм* и внутренним диаметром 0,076 *мм* [5-16].

Петля гистерезиса ферромагнитного материала, близкая к прямоугольной форме, изображена на рис. 5-1. Как видно из рисунка, при некоторой величине напряженности магнитного поля $+H_m$ индукция в ферромагнитном веществе достигает величины $+B_m$, соответствующей вершине предельной петли гистерезиса и близкой к магнитному насыщению. После прекращения действия напряженности поля ($H = 0$) сохраняется остаточная индукция $+B_r$, немногим ме́ньшая индукции $+B_m$. Если даже приложить напряженность поля противоположного направления с величиной, близкой к $H_m/2$, то в образце сохранится индукция положительного направления, хотя и несколько ме́ньшая по величине, но все же близкая к $+B_r$. Только когда напряженность достигнет величины $-H_c$ (коэрцитивная сила), происходит имеющее скачкообразный характер перемагничивание образца, индукция при напряженности поля $-H_m$ достигает значения $-B_m$ и после прекращения действия напряженности поля сохраняет значение $-B_r$. Таким образом, образец из материала с прямоугольной петлей гистерезиса характеризуется наличием двух устойчивых состояний: $B = +B_r$ и $B = -B_r$, причем, чтобы образец перешел из одного устойчивого состояния в другое, нужно приложить напряженность поля $H \approx +H_m$ или $H \approx -H_m$.

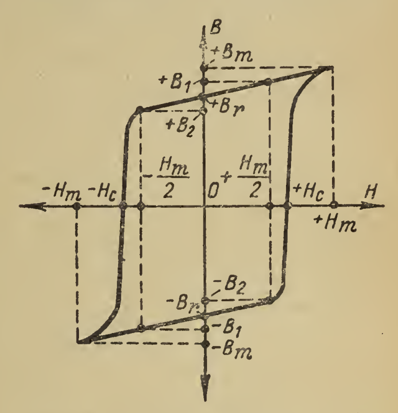


Рис. 5-1. Петля гистерезиса ферромагнитного материала.

Эти свойства ферритовых сердечников и используются при применении их в качестве элементов ЗУ. Если считать, что одно из устойчивых состояний сердечника соответствует записи в нем «0», а другое устойчивое состояние — записи «1», то, имея n сердечников, можно создать числовую ячейку, пригодную для сколь угодно длительного хранения зафиксированного в ней n-разрядного двоичного числа.

Важнейшим параметром ферритовых сердечников с точки зрения использования их в качестве запоминающих элементов является степень прямоугольности петли гистерезиса.

Форма статической петли гистерезиса идеального с точки зрения вычислительной техники феррита должна представлять собой правильный прямоугольник со сторонами, параллельными осям координат HB. Физически такая петля могла бы быть получена, если бы направления осей намагниченности всех доменов

совпадали с направлением внешнего поля, а при изменении направления последнего, при его определенном пороговом значении, происходил бы одновременный поворот всех доменов.

В действительности процесс перемагничивания в ферритовом образце в зависимости от интенсивности внешнего поля обусловливается обратимыми и необратимыми процессами смещения границ между доменами и вращения их векторов намагниченности. Поэтому реальная кривая зависимости $B = f(H)$ имеет форму, изображенную на рис. 5-1, отличающуюся от прямоугольной формы.

Степень прямоугольности петли гистерезиса принято характеризовать двумя величинами, условно называемыми *статическим* и *динамическим* коэффициентами прямоугольности.

Таблица 5-2

Марка феррита		Параметры феррита						
старое обозначение	новое обозначение	коэрцитивная сила H_c, *а/см*	остаточная индукция B_r, *тл*	коэффициент прямоугольности $K = B_r/B_m$	коэффициент перемагничивания S_w, *мкк/см*	напряженность поля старта H_0, *а/см*	максимальное дифференциальное динамическое сопротивление r_m, *ом/м*	температура Кюри Θ, °С
ВТ-1	1,3ВТ	1,0	23,5	0,92	0,40	1,40	0,215	280
ВТ-2	0,7ВТ	0,61	23,0	0,93	0,45	1,50	0,215	280
ВТ-5	0,16ВТ	0,12	18,5	0,92	0,35	0,60	0,225	150
ВТ-6	4ВТ	3,0	17,0	0,86	0,40	4,0	0,150	290
ВТ-7	2ВТ	1,6	18,0	0,92	0,32	2,3	0,180	290
К-28	1,5ВТ	1,12	25,0	0,90	0,47	1,45	0,195	280
К-260	0,9ВТ	0,65	25,0	0,90	0,45	1,3	0,195	260
К-272	0,27ВТ	0,21	21,0	0,92	0,27	0,60	0,250	145
П-212	0,3ВТ	0,24	25,0	0,95	0,33	1,0	0,260	190
Н-44	0,44ВТ	0,35	15,5	0,95	0,41	1,10	0,160	215
Н-85	0,37ВТ	0,23	13,0	0,95	0,43	0,85	0,115	175
ПП-24	0,12ВТ	0,12	17,0	0,91	0,27	0,50	0,230	140
—	0,2ВТ	0,17	22,0	0,95	0,42	0,60	0,150	—

Статический коэффициент прямоугольности K, являющийся показателем качества запоминающих свойств сердечника, выражается отношением величины остаточной индукции B_r к величине индукции в сердечнике при насыщении B_m. Обычно принимают B_m, измеренную при напряженности поля, равной $5H_c$.

$$K = \frac{B_r}{B_m} = 0,9 \div 0,95. \qquad (5\text{-}1)$$

У лучших образцов ферритовых сердечников величина K может достигать 0,96—0,98.

Динамический коэффициент прямоугольности R является весьма важной характеристикой ферритовых сердечников, работающих в схемах ЗУ:

$$R = \frac{B_2}{B_m}, \tag{5-2}$$

где B_2 — величина магнитной индукции при напряженности поля $H = -H_m/2$ (рис. 5-1). Динамический коэффициент прямоугольности часто называют также коэффициентом *квадратности*.

В табл. 5-2 [5-20] представлены основные магнитные параметры некоторых наиболее распространенных отечественных марок ферритов, большинство из которых вошло в нормаль (НО.030.003). Все параметры определены по квазистатическим петлям гистерезиса, снятым при максимальной напряженности поля $H_m = 5H_c$ и при температуре $+20°$ С. При пользовании таблицей следует учитывать, что из-за незначительных отклонений от технологии ферриты одной и той же марки, выпускаемые различными предприятиями, могут отличаться по своим параметрам.

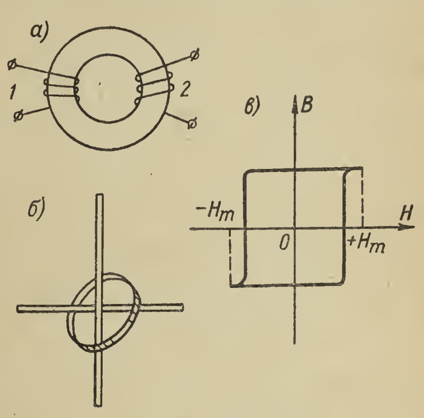


Рис. 5-2. Запоминающие элементы на ферромагнитных сердечниках (*а* и *б*) и идеально прямоугольная петля гистерезиса (*в*).

Один из простейших вариантов запоминающего элемента на ферритовом сердечнике изображен на рис. 5-2, *а*. Запоминающий элемент представляет собой сердечник с двумя обмотками: записи *1* и считывания информации *2*. Справа на рис. 5-2, *б* изображена идеализированная прямоугольная петля гистерезиса с коэффициентом прямоугольности $K = 1$. Условимся одно из направлений намагниченности, например против часовой стрелки, называть отрицательным ($-B_m$) и приписывать ему значение «0». Тогда другое направление намагниченности, по часовой стрелке, будем считать положительным ($+B_m$) и приписывать ему значение «1». Таким образом, запись информации в сердечнике может быть осуществлена пропусканием по обмотке *1* импульса тока того или другого направления с амплитудой, достаточной для создания напряженности поля H_m, обеспечивающей надежное перемагничивание сердечника.

Для считывания информации по обмотке *1* нужно опять пропустить импульс тока записи «0». Тогда, если в сердечнике была записана единица, магнитная индукция в нем изменится от значения $+B_m$ до значения $-B_m$, причем в обмотке *2*, естественно, индуктируется импульс э. д. с., используемый как сигнал

считывания «1». Если же был записан «0», то его магнитное состояние не изменится, в обмотке *2* э. д. с. не индуктируется, и на выходе не будет получен сигнал считывания. После считывания сердечник всегда оказывается в состоянии «0», т. е. информация в нем стирается, и если она должна быть сохранена, то необходимо предпринять специальные меры для ее восстановления (регенерации).

Однако такая идеальная картина процессов записи и считывания имела бы место лишь в случае идеальной прямоугольности петли гистерезиса материала сердечника. Фактически петля гистерезиса не является идеально прямоугольной, а имеет вид, изображенный на рис. 5-1. Тогда остаточная индукция в сердечнике при записи «0» имеет значение $-B_r$ а при записи «1» — значение $+B_r$. При считывании «1», следовательно, под влиянием импульса считывания происходит изменение индукции от $+B_r$ до $-B_m$, а затем, после прекращения импульса считывания, от $-B_m$ до $-B_r$.

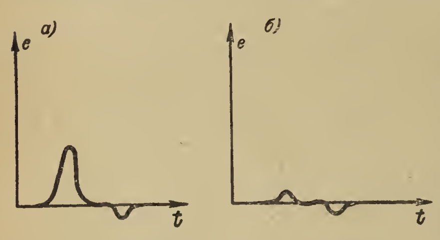


Рис. 5-3. Сигналы считывания информации с запоминающего сердечника: *а* — считывание «1»; *б* — считывание «0».

Таким образом, в обмотке *2* индуктируется два разнополярных импульса э. д. с. (рис. 5-3, *а*), причем первый из них является собственно сигналом считывания «1», а второй — помехой, обусловленной неидеальной прямоугольностью петли гистерезиса. При считывании «0» под влиянием импульса считывания индукция изменяется от $-B_r$ до $-B_m$, а затем, после окончания импульса считывания, — вновь от $-B_m$ до $-B_r$. В результате в обмотке *2* также индуктируются два разнополярных импульса э. д. с., являющихся помехами.

Различие между сигналами считывания «1» и «0» заключается, очевидно, в амплитуде первого импульса э. д. с., которая при считывании «1» будет значительно больше вследствие значительно большего изменения магнитной индукции, чем при считывании «0». Это позволяет в рассмотренном случае применять амплитудные дискриминаторы для распознавания считанной информации.

Однако положение значительно усложняется в случае применения ЗУ, содержащих большое количество запоминающих сердечников, когда возникает проблема выбора ячейки для записи или считывания. Если ЗУ содержит n запоминающих элементов, то можно было бы подвести к нему n коммутируемых проводов (отдельный провод к каждому элементу), но при этом схема коммутирующего устройства ЗУ большой емкости оказалась бы весьма дорогой и сложной. Поэтому, с целью упрощения коммутационных устройств, стремятся к максимальному снижению количества так называемых селектирующих проводов, т. е. проводов, по которым

к ЗУ подводятся импульсы токов или напряжений, позволяющие выбрать при записи или считывании информации необходимую запоминающую ячейку или элемент.

Одним из распространенных вариантов решения этой проблемы является применение матричных схем, работающих по принципу совпадения токов. Такая схема, содержащая, например, четыре запоминающих элемента, изображена на рис. 5-4.

В соответствии с этим принципом ферритовые сердечники располагаются в виде системы, состоящей из вертикальных и горизонтальных рядов. На каждом сердечнике располагаются по три обмотки, из них две служат для выбора нужных запоминающих элементов и для управления записью и считыванием информации, а третья является специальной обмоткой чтения. Все обмотки каждого из рядов соединены между собой последовательно, образуя шины X_1, X_2, ..., X_p и Y_1, Y_2, ..., Y_q. Одни концы этих шин являются входами ЗУ, а другие концы заземлены. Все обмотки считывания соединены между собой последовательно, причем один конец образуемой ими цепи заземлен, а второй является выходом считывания.

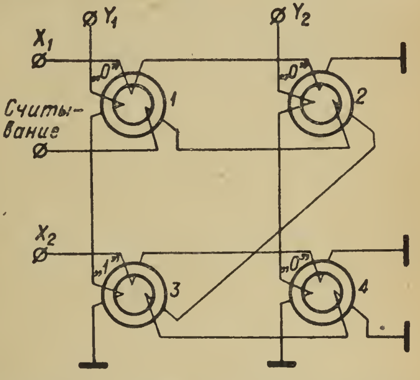


Рис. 5-4. Схема с выбором запоминающего элемента по принципу совпадения двух токов.

На входы X_1, X_2, ..., X_p и Y_1, Y_2, ..., Y_q в процессе записи или считывания информации подаются импульсы тока с амплитудой $I_m/2$, где I_m — величина тока, необходимая для создания напряженности H_m, требующейся для надежного перемагничивания сердечника.

Таким образом, протекание тока по одной из обмоток сердечника не может изменить его магнитного состояния. При пропускании же токов одинакового направления по обеим управляющим обмоткам (намотанным согласно) создаваемые ими поля складываются и напряженность поля достигает величины H_m, достаточной для перехода сердечника в то или иное устойчивое состояние.

Пусть начальным состоянием сердечников (запись «0») является состояние отрицательной намагниченности, обеспечиваемое пропусканием по управляющим обмоткам токов отрицательного направления. Тогда для приведения всех элементов ЗУ в начальное состояние, т. е. для стирания всей хранившейся в ЗУ информации, нужно на входы всех горизонтальных и вертикальных шин одновременно подать отрицательные импульсы тока.

Для записи же в каком-нибудь элементе, например элементе *3*, кода «1», нужно подать положительные импульсы на входы X_2 и Y_1. Тогда в сердечнике *3*, находящемся на пересечении шин

X_2 и Y_1, будет создана напряженность $+H_m$, достаточная для перемагничивания его в состояние положительной намагниченности. Сердечники же *1* и *4*, у которых положительный ток с амплитудой $I_m/2$, или, как часто говорят, *полуток*, протекает лишь по одной обмотке, останутся в состоянии отрицательной намагниченности. Отрицательную намагниченность сохранит и сердечник *2*.

Для считывания информации, записанной в каком-либо сердечнике, нужно подать отрицательные импульсы полутоков в пару шин XY, на пересечении которых находится сердечник. Так, для считывания информации с сердечника *3* отрицательные импульсы тока с амплитудой $I_m/2$ подаются на входы шин X_2 и Y_1. При этом напряженность поля, создаваемая обмотками сердечника *3*, оказывается достаточной для его перемагничивания в отрицательное состояние, и в обмотке считывания индуктируется импульс э. д. с., поступающий на выход считывания.

Так как полуток, протекающий по шине Y_1, проходит также и по одной из обмоток сердечника *1*, а полуток шины X_2 — по одной из обмоток сердечника *4*, то вследствие непрямоугольности петель гистерезиса сердечников магнитная индукция в них изменится от величины $-B_r$ до величины $-B_1$ (рис. 5-1), и в обмотках считывания этих неизбранных сердечников также индуктируются импульсы э. д. с. с небольшой амплитудой, поступающие как помехи на выход считывания.

Аналогично происходит считывание информации и с любого другого сердечника. Например, для считывания информации с сердечника *4*, в котором записан код «0», отрицательные импульсы тока с амплитудой $I_m/2$ одновременно подаются на входы шин X_2 и Y_2. Тогда в сердечнике *4* создается напряженность поля $-H_m$, вызывающая изменение индукции от величины $-B_r$ до $-B_m$ и затем, после окончания импульсов в шинах X_2 и Y_2, — снова от $-B_m$ до $-B_r$. При этом в обмотке считывания индуктируются импульсы э. д. с. небольшой амплитуды, воспринимаемые на выходе считывания как помехи. Э. д. с. помех индуктируется также и в обмотках считывания сердечника *3*, вследствие изменения индукции от $+B_r$ до $+B_2$, и сердечника *2*, вследствие изменения индукции от $-B_r$ до $-B_1$ и обратно от $-B_1$ до $-B_r$. Все эти помехи также поступают на выход считывания. Кроме того, отрицательный полуток, протекающий по одной из обмоток сердечника *3*, намагниченного в положительном направлении, хотя и не перемагничивает его, но несколько размагничивает, и после действия этого полутока остаточная индукция, очевидно, не достигает опять значения $+B_r$, а становится несколько меньше.

Более детальная схема и дальнейшие подробности работы матричного ЗУ с совпадением токов будут рассмотрены ниже в гл. 6. Однако и на основании уже сказанного можно сделать следующие выводы относительно особенностей работы сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса как элементов ЗУ.

1. При считывании избранного сердечника, кроме полезного сигнала считывания с большой амплитудой, вследствие неидеальной прямоугольности петли гистерезиса, в его обмотке считывания возникает еще дополнительная э. д. с. помехи со значительно меньшей амплитудой.

2. В определенных типах схем ЗУ, например в схеме с совпадением токов, э. д. с. помех, обусловленные неидеальной прямоугольностью петли гистерезиса, индуктируются также и в обмотках считывания неизбранных сердечников. При этом, если все обмотки считывания соединены между собой последовательно, как показано на рис. 5-4, то на выходе считывания появляется напряжение помехи, равное алгебраической сумме напряжений помех, индуктированных во всех сердечниках.

3. При прохождении по обмоткам неизбранных сердечников токов, создающих напряженность поля с полярностью, противоположной полярности их остаточной индукции, хотя эта напряженность поля меньше коэрцитивной силы и недостаточна для перемагничивания сердечников, происходит некоторое снижение величины их остаточной индукции. Многократное воздействие таких размагничивающих токов может при определенных условиях вызвать стирание информации, зафиксированной в сердечниках, считывание с которых не производилось.

5-2. Статические характеристики сердечников

Статические, или, точнее, квазистатические петли гистерезиса, снятые при перемагничивании в медленно изменяющихся полях, далеко не полностью отражают поведение образца при импульсном воздействии на него. Однако в качестве начального критерия для выбора материалов или конфигурации запоминающего элемента можно использовать форму его статической петли гистерезиса и некоторые параметры, определяемые по этой петле. Относительная простота построения и анализа статических характеристик оправдывает применение их для предварительной оценки свойств запоминающих элементов и позволяет с определенной достоверностью судить о целесообразности использования последних. Наконец, анализ процессов поведения запоминающих элементов по их статическим характеристикам облегчает последующий анализ соответствующих процессов в динамическом режиме. Поэтому изучение статических гистерезисных зависимостей $B = f(H)$ имеет важное практическое значение при исследовании поведения ферромагнитных сердечников в ЗУ.

Рассмотрим прежде всего вопрос о форме статической петли гистерезиса магнитного сердечника в зависимости от его геометрии.

На рис. 5-5 изображен в разрезе тороидальный магнитный сердечник с внутренним радиусом $r_в$ и внешним (наружным)

радиусом $r_н$. Сердечник пронизан проводом, по которому протекает ток I.

Предположим, что сердечник изготовлен из однородного ферромагнитного материала с идеальной петлей гистерезиса, показанной на рис. 5-2, *б*. Покажем, как изменяется полный магнитный поток в сердечнике в зависимости от величины тока, т. е. выведем аналитически зависимость $\Phi = f(I)$. Очевидно, максимальная величина потока Φ_m ограничена значением максимальной индукции материала и площадью поперечного сечения сердечника S:

$$\Phi_m = B_m S, \tag{5-3}$$

где

$$S = (r_н - r_в)\,h.$$

Каждый из цилиндрических слоев сердечника толщиной dr, расположенный на некотором расстоянии r' от оси провода, может перемагнититься лишь в том случае, если напряженность поля в нем достигнет величины коэрцитивной силы материала. Таким образом, при нарастании тока I и, соответственно, напряженности поля, а также в предположении, что перемагничивание отдельных слоев тора происходит независимо друг от друга, можно считать, что сечение перемагниченной части тора

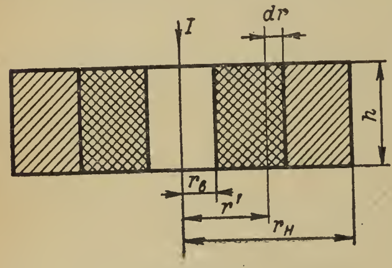


Рис. 5-5. Разрез тороидального сердечника.

$$S' = (r' - r_в)\,h,$$

а магнитный поток в перемагниченной части

$$\Phi' = B_m S'. \tag{5-4}$$

Для того чтобы построить график зависимости $\Phi = f(I)$ нужно определить уравнение восходящей и нисходящей ветвей петли, поскольку сверху и снизу она ограничена прямыми, параллельными оси абсцисс, соответствующими значениям: $\Phi = +\Phi_m$ и $\Phi = -\Phi_m$.

Составим уравнение для восходящей ветви гистерезисной кривой. Пусть в начальном состоянии сердечник намагничен до насыщения в отрицательном направлении и поток в нем равен $-\Phi_m$. Будем увеличивать ток I, создающий напряженность поля положительного направления. Как только напряженность поля на расстоянии $r_в$ от оси провода достигнет величины коэрцитивной силы материала, начнется послойное перемагничивание сердечника, причем значение магнитной индукции $-B_m$ будет в перемагниченных слоях сменяться значением $+B_m$. Следовательно, результирующий поток Φ в сердечнике при перемагничивании части его сечения (см. рис. 5-5) будет определяться выражением:

$$\Phi = -(\Phi_m - \Phi') + \Phi' = -\Phi_m + 2\Phi'. \tag{5-5}$$

Равенства (5-3) и (5-4) можно записать:

$$\Phi' = \Phi_m \frac{S'}{S} = \Phi_m \frac{r' - r_{\text{в}}}{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}}. \qquad (5\text{-}6)$$

Подставляя это значение Φ' в равенство (5-5), после несложных преобразований получим:

$$\Phi = \Phi_m \left(- \frac{r_{\text{н}} + r_{\text{в}}}{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}} + 2 \frac{r'}{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}} \right). \qquad (5\text{-}7)$$

Радиус перемагниченной зоны r зависит от величины тока I. Как известно,

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \qquad (5\text{-}8)$$

Подставляя в выражение (5-8) вместо H коэрцитивную силу $H_{\text{с}}$, можно найти значение радиуса

$$r' = \frac{I}{2\pi H_{\text{с}}}. \qquad (5\text{-}9)$$

Подставляя полученное значение r' в (5-7), получим уравнение, выражающее зависимость $\Phi = f(I)$:

$$\Phi = \Phi_m \left[- \frac{r_{\text{н}} + r_{\text{в}}}{r_{\text{н}} - r_{\text{в}}} + \frac{1}{\pi H_{\text{с}} (r_{\text{н}} - r_{\text{в}})} \right]. \qquad (5\text{-}10)$$

Если, согласно (5-3), выразить Φ_m через B_m, то уравнение (5-10) примет вид:

$$\Phi = - B_m h (r_{\text{н}} + r_{\text{в}}) + \frac{B_m h}{\pi H_{\text{с}}} I. \qquad (5\text{-}11)$$

Так как за исключением I все величины в выражениях (5-10) и (5-11) для сердечника данных размеров и из данного материала постоянны, то оба эти выражения представляют собой, очевидно, уравнения прямой линии, угол наклона которой φ к оси абсцисс определяется выражением:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{B_m h}{\pi H_{\text{с}}}. \qquad (5\text{-}12)$$

Уравнения (5-11) и (5-12), согласно (5-9), справедливы в пределах от $I_1 = 2\pi r_{\text{в}} H_{\text{с}}$, когда начинается перемагничивание сердечника, до $I_2 = 2\pi r_{\text{н}} H_{\text{с}}$, когда перемагничивание заканчивается. При $I < I_1$ и $I > I_2$ состояние сердечника не изменяется, и магнитный поток в нем равен в первом случае $\Phi = - \Phi_m$, а во втором случае $\Phi = + \Phi_m$, что может быть проверено подстановкой соответствующих значений I.

Аналогично выводится и уравнение нисходящей ветви зависимости $\Phi = f(I)$. На рис. 5-6, *а* представлен график этой зависимости, имеющий форму параллелограмма с верхней и нижней сторонами, параллельными оси абсцисс, и наклонными боковыми сторонами. Как следует из (5-12), тангенс угла наклона боковых сторон определяется лишь характеристиками материала и прямо

пропорционален высоте сердечника h, но никак не зависит ни от величины, ни от соотношения внешнего и внутреннего радиусов сердечника.

Величиной же радиусов, или, точнее, величиной их суммы $r_н + r_в$, определяется ширина параллелограмма, т. е. расстояние по горизонтали между его боковыми сторонами. Наконец, высота гистерезисного параллелограмма прямо пропорциональна площади поперечного сечения сердечника $(r_н - r_в)\,h$.

Выведем теперь уравнение для построения статической петли гистерезиса сердечника, выражающей зависимость $B = f\,(H)$.

Так как в процессе перемагничивания индукция в различных слоях сердечника будет иметь различные значения, условимся понимать под индукцией ее усредненное значение, определяемое отношением результирующего магнитного потока к площади сечения сердечника:

$$B = \frac{\Phi}{S}. \qquad (5\text{-}13)$$

Тогда, подставляя в это выражение значение потока Φ из (5-11) и значение площади сечения S из (5-3), получим зависимость $B = f\,(I)$ в виде:

$$B = -B_m \frac{r_н + r_в}{r_н - r_в} + \frac{B_m}{\pi H_c} \cdot \frac{1}{r_н - r_в} I. \qquad (5\text{-}14)$$

Для получения искомой зависимости $B = f\,(H)$ нужно в уравнении (5-14) выразить I через пропорциональную ему напряженность поля H. Однако, так как напряженность имеет неодинаковые значения в слоях сердечника, находящихся на различных расстояниях от оси провода, необходимо условиться, в каком именно слое определять величину H. Обычно в качестве такого слоя выбирают средний слой сердечника, который находится от оси провода на расстоянии

$$r_{ср} = \frac{1}{2}(r_н + r_в). \qquad (5\text{-}15)$$

В соответствии с (5-8) и (5-15) для этого слоя можно написать соотношение:

$$I = 2\pi r_{ср} H = \pi (r_н + r_в) H. \qquad (5\text{-}16)$$

Подставляя полученное значение I в уравнение (5-14), получим:

$$B = -B_m \frac{r_н + r_в}{r_н - r_в} + \frac{B_m}{H_c} \cdot \frac{r_н + r_в}{r_н - r_в} H. \qquad (5\text{-}17)$$

Введем обозначение α для отношения внешнего и внутреннего радиусов сердечника:

$$\alpha = \frac{r_н}{r_в}. \qquad (5\text{-}18)$$

Тогда

$$\frac{r_н + r_в}{r_н - r_в} = \frac{\alpha + 1}{\alpha - 1}, \qquad (5\text{-}19)$$

и уравнение для восходящей ветви петли гистерезиса принимает вид:

$$B = \frac{B_m}{H_c} \cdot \frac{\alpha+1}{\alpha-1} (H - H_c). \tag{5-20}$$

Значения индукции, определенные из уравнения (5-20), правильны лишь в пределах $-B_m < B < +B_m$.

График гистерезисной зависимости $B = f(H)$ для сердечника, изготовленного из материала с идеальной ППГ, представлен на рис. 5-6, *б*.

Угол наклона восходящей и нисходящей ветвей гистерезиса

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{B_m}{H_c} \cdot \frac{\alpha+1}{\alpha-1}. \tag{5-21}$$

Таким образом, для материала с параметрами B_m и H_c значение $\operatorname{tg} \Psi$ пропорционально величине $(\alpha + 1)/(\alpha - 1)$ и, следовательно, наклон боковых сторон петли гистерезиса зависит только от отношения радиусов сердечника $\alpha = r_н/r_в$. При уменьшении этого отношения, когда $\alpha \to 1$, угол наклона $\psi \to 90°$, и петля гистерезиса сердечника все больше приближается к петле гистерезиса материала. При увеличении α угол наклона уменьшается, и в пределе, когда $(\alpha + 1)/(\alpha - 1) \to 1$, $\psi \to \operatorname{arctg}(B_m/H_c)$.

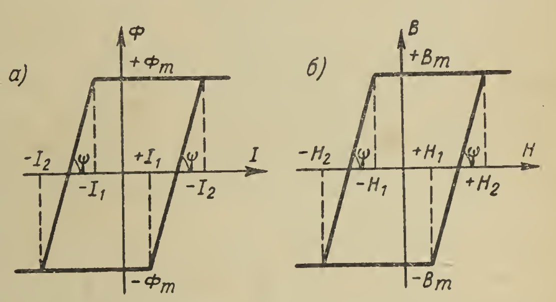


Рис. 5-6. Графики статических петель гистерезиса для тороидального сердечника из материала с идеально прямоугольной петлей гистерезиса: *а* — график зависимости $\Phi = f(I)$, *б* — график зависимости $B = f(H)$.

Значения H_1 и H_2 на рис. 5-6, *б* представляют собой те значения напряженности поля, действующей по средней линии сердечника, при которых соответственно напряженность поля во внутреннем и в наружном слоях достигает величины коэрцитивной силы H_c, т. е. при которых начинается и заканчивается процесс перемагничивания сердечника.

Более точный анализ формы статической петли гистерезиса ферромагнитных сердечников с учетом их геометрических размеров приведен в работах [1-2, 5-26, 5-45 и др.]. При этом установлено, что отношение внешнего и внутреннего диаметров тороидальных сердечников из ферромагнитного материала с идеальной ППГ существенно влияет на магнитные свойства сердечников. В частности, при увеличении этого отношения происходит уменьшение дифференциальной магнитной проницаемости на восходящих и нисходящих ветвях петли гистерезиса, нарушается линейность

зависимости $B = f(H)$ этих ветвей и уменьшается динамический коэффициент прямоугольности сердечника.

Все соображения, приведенные в данном параграфе, относятся к предельной петле гистерезиса, которая устанавливается после нескольких (порядка десяти) симметричных изменений поля в пределах $-H_m < H < +H_m$. Аналогичные соотношения можно применить и для аналитического описания статических петель гистерезиса при перемагничивании по симметричным частным циклам (рис. 5-7, *а*). Значительно сложнее, однако, обстоит дело с аналитическим описанием процессов перемагничивания по несимметричным частным циклам (рис. 5-7, *б*), формы которых отличаются значительным разнообразием и существенно зависят,

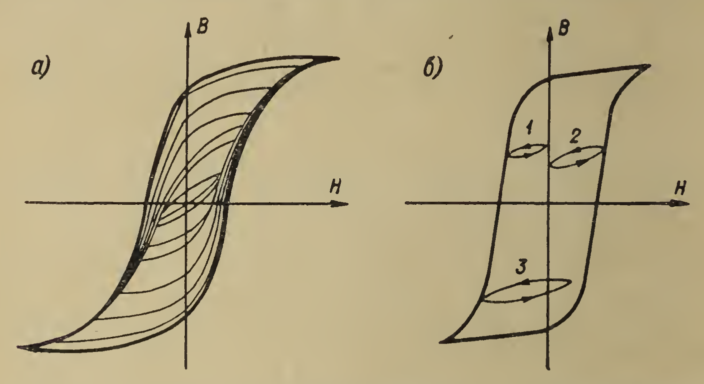


Рис. 5-7. Частные гистерезисные циклы: *а* — симметричные; *б* — несимметричные.

во-первых, от предыстории магнитных состояний образца, т. е. от выбранной начальной точки в системе координат B, H и от хода зависимости $B = f(H)$, по которому эта точка была достигнута до начала развития рассматриваемого процесса; и, во-вторых, от абсолютных значений и степени несимметрии воздействующего на сердечник поля.

Учитывая, что предельная петля гистерезиса может заключать внутри себя бесконечное количество отличных друг от друга частных гистерезисных циклов, невозможно вывести аналитические зависимости, которые описывали бы все эти частные циклы. Практически целесообразным может оказаться аналитическое описание лишь некоторых конкретных частных циклов, определяемых условиями работы данного ферромагнитного элемента в том или ином устройстве.

В применении к запоминающим элементам весь процесс анализа значительно усложняется еще и тем обстоятельством, что при записи и считывании информации в ЗУ перемагничивание элементов осуществляется, как правило, в быстро изменяющихся во времени магнитных полях. Это требует учета ряда дополни-

тельных факторов, таких, как влияние вихревых токов, магнитной вязкости вещества, магнитной аккомодации, формы импульса напряженности поля, скорости ее нарастания и т. д. Некоторые из этих вопросов рассмотрены в следующем параграфе.

5-3. Динамические характеристики сердечников и их импульсное перемагничивание

В динамике процесса перемагничивания ферромагнитных элементов связь между напряженностью поля и магнитной индукцией не может быть выражена в виде функциональной зависимости $B = f(H)$ или $F(B, H) = 0$, так как для разных видов функций $H = f(t)$ одним и тем же значениям напряженности H соответствуют различные значения индукции B.

К. М. Поливанов [5-21] предложил заменить простейшую функциональную зависимость между индукцией и напряженностью для описания динамики перемагничивания сложной зависимостью

$$F\left(B, H, \frac{dB}{dt}, \frac{dH}{dt}, \frac{d^2B}{dt^2}, \frac{d^2H}{dt^2}, \ldots\right) = 0. \qquad (5\text{-}22)$$

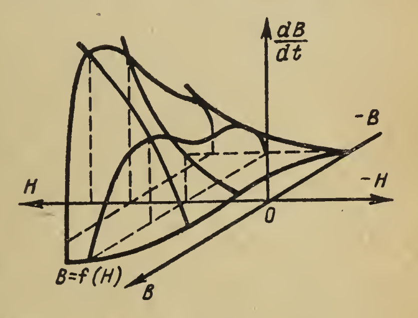


Рис. 5-8. Поверхность динамического равновесия системы, описываемой уравнением $F(B, H, dB/dt) = 0$.

При этом плоская кривая, которой выражалась зависимость $B = f(H)$, заменяется гиперповерхностью в n-мерном фазовом пространстве с координатами B, H, dB/dt, dH/dt, d^2B/dt^2, d^2H/dt^2, ...

Однако для практических целей в первом приближении можно, пренебрегая влиянием всех остальных производных, представить эту зависимость в упрощенном виде:

$$F\left(B, H, \frac{dB}{dt}\right) = 0, \qquad (5\text{-}23)$$

близком к уравнению вязкости $dB/dt = K(B_m - B)$, выведенному В. К. Аркадьевым. Тогда динамические состояния в процессе перемагничивания можно наглядно представить с помощью поверхности в трехмерном фазовом пространстве с координатами B, H и dB/dt.

Часть такой поверхности динамического равновесия системы при перемагничивании ее из состояния $-B_r$ в состояние $+B_m$, т. е. часть, соответствующая положительным значениям производной dB/dt, показана на рис. 5-8. Очевидно, вся эта часть поверхности расположена в верхнем полупространстве над плоскостью BOH.

Линия пересечения поверхности динамического равновесия с плоскостью BOH, являющаяся геометрическим местом точек, отвечающих условию:

$$F(B,\ H)=0, \tag{5-24}$$

т. е. условию статического режима $dB/dt = 0$, представляет собой статическую гистерезисную кривую в системе координат B, H на плоскости.

Не показанная на рисунке вторая часть поверхности динамического равновесия, соответствующая отрицательным значениям dB/dt, полностью симметрична изображенной части относительно координатных осей. Экспериментальное построение этой зависимости осуществляется сравнительно легко благодаря тому, что напряженность внешнего поля (для тороидального сердечника она численно совпадает с истинной напряженностью) пропорциональна току; производная от средней по сечению индукции пропорциональна э. д. с., индуктированной в обмотке считывания, а значит, при ненагруженной обмотке производная пропорциональна напряжению на зажимах обмотки:

$$\frac{dB}{dt} \equiv e = u. \tag{5-25}$$

Величина средней индукции пропорциональна интегралу от этого напряжения:

$$B \equiv \int_0^t u\,dt. \tag{5-26}$$

Теория динамики перемагничивания ферромагнетиков получила существенное развитие в ряде работ, выполненных в МЭИ под руководством К. М. Поливанова и Ю. М. Шамаева [5-31 и др.]. В основу исследований положены основные соотношения, полученные В. К. Аркадьевым [5-2], Бозортом [5-7] и Джорджи [5-37]. В этих работах показано, что скорость изменения индукции для ферромагнетиков с ППГ пропорциональна разности между напряженностью приложенного поля H и некоторой постоянной пороговой напряженностью H_0 (полем старта):

$$\frac{dB}{dt} = r(B)\,(H - H_0). \tag{5-27}$$

Здесь $r(B)$ — так называемое нормированное сопротивление.

$$r(B) = r_m\left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right), \tag{5-28}$$

где r_m — максимальное значение дифференциального динамического сопротивления, *ом/м*.

В качестве одной из характеристик процессов перемагничивания В. К. Аркадьевым была введена величина

$$Q = \int_0^t (H - H_0)\, dt, \qquad (5\text{-}29)$$

названная им **натиском** или **импульсом поля**. Величину Q можно определить как заряд, который протек через намагничивающую обмотку при перемагничивании образца. Если в (5-29) вместо t подставить время перемагничивания образца τ, то получим величину натиска поля Q_w, необходимую для перемагничивания образца, которую обозначают через S_w, называя ее **коэффициентом перемагничивания** или **коэффициентом переключения**

$$Q_w = \int_0^\tau (H - H_0)\, dt = S_w. \qquad (5\text{-}30)$$

В случае когда перемагничивающий импульс имеет прямоугольную форму, т. е. когда напряженность поля H постоянна, это выражение принимает вид:

$$(H - H_0)\,\tau = S_w. \qquad (5\text{-}31)$$

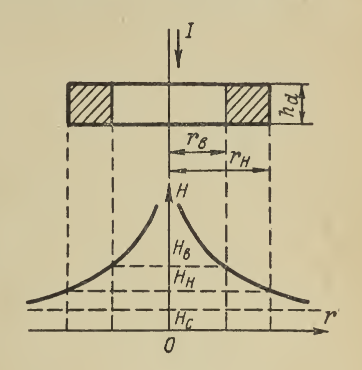


Рис. 5-9. Распределение напряженности магнитного поля по сечению сердечника.

Для импульса произвольной формы в выражении (5-31) вместо H нужно брать среднее значение действующей напряженности поля $H_{ср}$.

Остановимся на некоторых вопросах импульсного перемагничивания сердечников. При построении статических петель гистерезиса указывалось, что по мере плавного увеличения тока в намагничивающей обмотке напряженность поля достигает величины коэрцитивной силы материала сначала во внутреннем слое сердечника, прилегающем к внутренним его стенкам, а затем во все более удаленных от отверстия концентрических слоях. Однако при работе сердечника в качестве запоминающего элемента перемагничивание его часто осуществляется не медленно нарастающим током, а импульсами, форма которых может приближаться к прямоугольной.

Предположим, что импульс перемагничивающего тока имеет идеальную прямоугольную форму, а амплитуда его такова, что даже в наиболее удаленных от центра слоях сердечника создается напряженность поля $H_н$, превышающая коэрцитивную силу материала $H_с$ (рис. 5-9). При таком условии перемагничивание начнется одновременно во всех слоях сердечника, однако происходить оно будет с неодинаковой скоростью. В самом деле,

время τ, необходимое для перемагничивания некоторого слоя, в соответствии с выражением (5-31),

$$\tau = \frac{S_w}{H - H_0}. \tag{5-32}$$

Так как напряженность поля, создаваемая током I, обратно пропорциональна расстоянию r от проводника: $H = I/2\pi r$, то внутренний слой сердечника перемагнитится за время

$$\tau_в = \frac{S_w}{\frac{I}{2\pi r_в} - H_0}, \tag{5-33}$$

а наружный слой перемагнитится за время

$$\tau_н = \frac{S_w}{\frac{I}{2\pi r_н} - H_0}. \tag{5-34}$$

Таким образом, хотя при идеально прямоугольной форме импульса перемагничивающего тока (при времени нарастания переднего фронта, равном нулю) перемагничивание всего сечения сердечника начинается одновременно, окончание перемагничивания слоев оказывается растянутым в промежутке времени от $\tau_в$ до $\tau_н$.

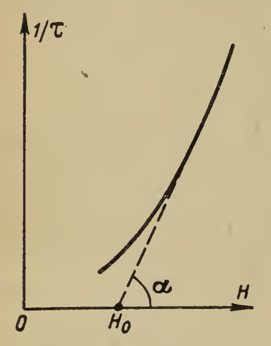


Рис. 5-10. График зависимости $1/\tau = f(H)$.

Практически импульс перемагничивающего тока имеет более или менее пологий передний фронт, что обусловлено как внутренними характеристиками генератора (формирователя) импульсов, так и индуктивным характером нагрузки (обмотка на ферромагнитном сердечнике). Значит, ток в обмотке и соответственно напряженность магнитного поля нарастают постепенно, и только через некоторое время после включения напряженность во внутреннем слое достигает величины коэрцитивной силы материала, когда начинается перемагничивание сердечника. В более удаленных от центра слоях этот момент наступает позднее. Следовательно, эти более удаленные слои, во-первых, начинают перемагничиваться позднее, чем внутренние слои, и, во-вторых, сам процесс перемагничивания протекает в них медленнее.

Таково упрощенное качественное описание механизма послойного перемагничивания сердечника. Точное количественное описание этих процессов требует знания формы перемагничивающего импульса, а также учета ряда таких менее существенных дополнительных факторов, как вихревые токи, потери энергии в материале сердечника и др.

Учитывая большое значение скорости перемагничивания сердечников при работе их в качестве элементов оперативных ЗУ, рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

На рис. 5-10 приведен график $1/\tau = f(H)$, из которого величина S_w может быть определена как котангенс угла наклона α спрямленного графика зависимости $1/\tau = f(H)$, к оси абсцисс, по которой откладываются значения напряженности поля.

В основу анализа процесса перемагничивания ферритов в простейшем случае принимается модель движения стенок доменов. Однако механизм микропроцесса перемагничивания ферритов с ППГ в настоящее время еще окончательно не установлен. Если в условиях квазистатического перемагничивания ферромагнетиков с ППГ процессы достаточно хорошо объясняются смещением границ доменов, то в условиях импульсного перемагничивания такое объяснение оказывается недостаточным. В частности, Джорджи [5-37] высказана точка зрения о том, что основным механизмом перемагничивания в этих условиях является вращение векторов намагниченности.

В работе [5-47] приведен анализ зависимости $1/\tau = f(H)$, полученной экспериментальным путем при импульсном перемагничивании сердечников, изготовленных из магний-марганцевого феррита. На графике этой зависимости (рис. 5-11, *а*) можно выделить три почти прямолинейных участка, наклон каждого из которых характеризуется своей константой S_w (рис. 5-11, *б*). Этим участкам соответствуют три доминирующих механизма перемагничивания.

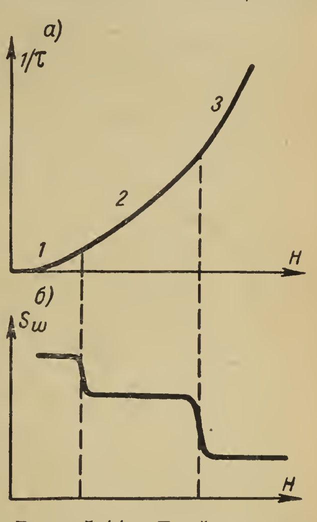


Рис. 5-11. Графики, подтверждающие наличие различных механизмов перемагничивания: *а* — зависимость $1/\tau = f(H)$; *б* — зависимость $S_w = f(H)$.

На участке *1* перемагничивание обусловлено в основном смещением границ доменов, на участке *2* — некогерентным вращением векторов намагниченности, а на участке *3* — когерентным вращением. Последнее возможно лишь при воздействии напряженностей поля, в шесть — десять раз превышающих коэрцитивную силу. Такие поля, как правило, не используются при перемагничивании сердечников в ЗУ.

В большинстве исследований измерения коэффициента переключения S_w производились в полях с напряженностью $H = (1{,}5 \div 6)\,H_c$, что соответствует приблизительно участку *2*. Эта область полей как раз и представляет наибольший интерес при анализе процессов в ферритовых сердечниках, работающих в качестве запоминающих или переключающих элементов.

На основании теоретической оценки значений S_w в работе [5-10] показано, что наиболее близкие к полученным в эксперименте величинам S_w дает модель некогерентного вращения.

У магний-марганцевых ферритов с $H_с = 0,6 \div 1,6$ *а/см* в магнитных полях, соответствующих области некогерентного вращения, величина $S_w = 0,43 \div 0,46$ *мкк/см*, а пороговое поле $H_0 \approx \approx H_с + (0,1 \div 0,16)$ *а/см*.

На основании обработки значительного количества результатов измерений для определения поля старта получены следующие эмпирические зависимости [5-11]:

$$H_0 = \begin{cases} (1,2 \div 1,4)\, H_с & \text{для} \quad H_с > 0,64 \ а/см; \\ (1,4 \div 1,6)\, H_с & \text{для} \quad H_с \leq 0,64 \ а/см. \end{cases}$$

При этом коэффициент при $H_с$ следует брать тем меньшим, чем больше динамический коэффициент прямоугольности (коэффициент квадратности) статической петли гистерезиса ферромагнетика.

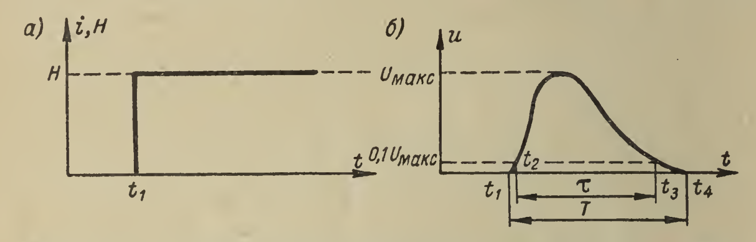


Рис. 5-12. Процессы перемагничивания при скачке напряженности поля: *а* — зависимость $H = f(t)$; *б* — зависимость $e = f(t)$.

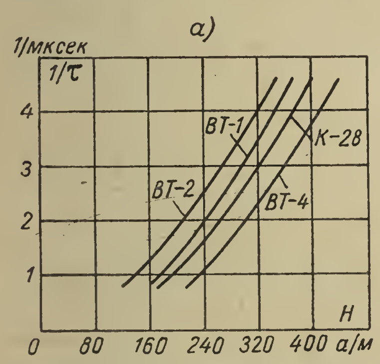
По ряду причин, а именно, вследствие вязкости, неравномерной скорости движения границ доменов и вращения векторов намагниченности, послойного механизма перемагничивания и так далее, импульс э. д. с., индуктированной в выходной обмотке, имеет сложную форму, связанную некоторой, не поддающейся точному аналитическому описанию, зависимостью с формой и амплитудой импульса перемагничивающего тока.

Изучение формы выходного импульса (импульса считывания) представляет существенный интерес, с одной стороны, как средство исследования процессов перемагничивания и, в частности, определения скорости перемагничивания. С другой стороны, знание формы импульса считывания позволяет извлекать из ЗУ код информации в определенные моменты, соответствующие максимальной величине отношения полезного сигнала к помехе и, таким образом, добиваться помехоустойчивости и надежности работы ЗУ.

Наиболее простым, с точки зрения теоретического анализа, случаем является перемагничивание тороидального сердечника при скачке перемагничивающего тока и поля (рис. 5-12, *а*). При скачкообразном нарастании м. д. с. перемагничивания и при условии, что напряженность перемагничивающего поля $H > H_с$, в выходной обмотке наводится импульс э. д. с. и соответственно на выходе ее появляется напряжение u, близкое по форме к колоколообразному (рис. 5-12, *б*). Нарастание напряжения u от нуля

начинается в момент t_1 включения тока перемагничивания, оно достигает максимальной величины $U_{\text{макс}}$ и затем, к моменту t_4, снижается до нуля. Очевидно, что процессы перемагничивания сердечника происходят в течение всего промежутка времени $T = t_4 - t_1$.

В начале и в конце процесса э. д. с., индуктированная в выходной обмотке, весьма мала, что свидетельствует о малой интенсивности протекающих в этот период процессов, вследствие чего можно считать, что фактически интенсивное перемагничивание сердечника происходит за время $\tau < T$. Вопросам исследования формы сигнала считывания посвящен ряд специальных работ [5-40, 5-42 и др.]. Относительно подробно эти вопросы рассмотрены в [1-11].



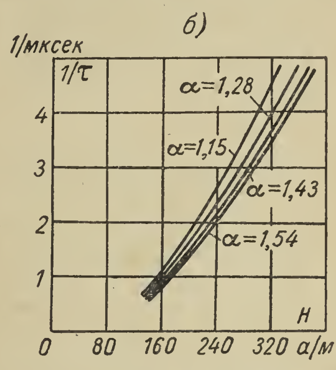


Рис. 5-13. Кривые зависимости $1/\tau = f(H)$: *а* — для сердечников из ферритов марок: 0,7ВТ (ВТ-2); 1,3ВТ (ВТ-1); 1,5ВТ (К-28); ВТ-4; *б* — для сердечников из феррита 1,3ВТ (ВТ-1) с различными отношениями диаметров $\alpha = D/d$.

В большинстве случаев временем перемагничивания условно считают время $\tau = t_3 - t_2$, где t_2 и t_3 — моменты времени в начале и в конце перемагничивания, в которые напряжение на выходе составляет 10% от его максимального значения, т. е. $U_{t2} = U_{t3} = 0{,}1\ U_{\text{макс}}$.

Экспериментальные исследования скорости импульсного перемагничивания ферритовых сердечников отечественных марок, проводившиеся в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР, описаны В. В. Бардижем [5-4]. На специальной импульсной установке, обеспечивающей получение импульсов тока с малой длительностью переднего фронта $t_r = 0{,}02$ *мксек*, снимались характеристики $1/\tau = f(H)$.

Результаты исследования сердечников с наружным диаметром 2,03 *мм* и внутренним диаметром 1,31 *мм*, изготовленных из ферритов марок 0,7ВТ; 1,3ВТ; 1,5ВТ и ВТ-4, приведены на рис. 5-13, *а*.

В той же работе рассматривается влияние геометрических размеров сердечника на характер кривых $1/\tau = f(H)$. На рис. 5-13, *б*, например, приведено семейство этих кривых для

сердечников из феррита 1,3ВТ с наружным диаметром $D = 2$ *мм* и внутренним диаметром $d = 1{,}74$; 1,56; 1,4 и 1,3 *мм*. Таким образом, геометрия этих сердечников характеризуется коэффициентами α (5-18), равными 1,15; 1,28; 1,43 и 1,54.

Из кривых видно, что с уменьшением α, т. е. с уменьшением относительной толщины стенки сердечника при данной величине напряженности перемагничивающего поля H, время перемагничивания уменьшается и соответственно уменьшается коэффициент перемагничивания сердечника S_w.

Следует указать на существенную зависимость времени перемагничивания и величины коэффициента перемагничивания S_w от температуры. Теоретическому и экспериментальному исследованию этого очень важного для эксплуатации ЗУ вопроса посвящено значительное количество работ [5-28, 5-29, 5-38 и др.] Некоторые данные о температурной зависимости статических параметров ферритов и коэффициента перемагничивания приведены ниже в § 5-6.

5-4. Некоторые методы считывания и записи информации

Как уже говорилось в § 5-1, простейший способ считывания информации с сердечника сводится к записи в нем нуля и сопровождается стиранием (разрушением) записанной информации. Однако при решении задач бóльшая часть считанной информации должна сохраняться для использования на последующих этапах решения. Это делает актуальным применение различных методов так называемого неразрушающего считывания, как резерва увеличения общего быстродействия ЗУ.

Неразрушающее считывание с обычных тороидальных ферромагнитных сердечников может быть осуществлено одним из следующих методов.

1. Использование явлений взаимодействия непараллельных магнитных потоков. Наиболее распространен метод считывания поперечным (квадратурным) полем, или, короче, *квадратурное считывание*.

2. Считывание очень короткими импульсами поля, основанное на явлениях вязкости и упругого смещения доменных стенок ферромагнетика.

3. Метод изменения проницаемости материала запоминающего элемента. Так как при этом методе для считывания используются токи высокой частоты радиотехнического диапазона, то его называют также *радиочастотным* или высокочастотным *считыванием*. Наряду с высокочастотным считыванием возможно применение и высокочастотных методов записи информации.

Еще одним резервом уменьшения времени обращения к ЗУ является ускорение записи и считывания информации в запоминающих элементах за счет перемагничивания по частным циклам гистерезиса.

Одним из путей повышения надежности ЗУ за счет снижения токов возбуждения, которые могут вызывать разрушение информации в неизбранных элементах, является перемагничивание запоминающих элементов с использованием так называемой идеальной петли гистерезиса. Рассмотрим несколько подробнее перечисленные методы.

В основе неразрушающего считывания поперечным полем лежат явления, имеющие место при воздействии на ферромагнетик взаимно перпендикулярных полей. Физику этих явлений можно вкратце описать следующим образом.

Представим векторы индукции B и напряженности поля H через их ортогональные составляющие B_x, B_y, B_z и H_x, H_y, H_z. Если в процессе работы запоминающего элемента взаимодействуют только два взаимно перпендикулярных поля, то векторы индукции и напряженности поля всегда расположены в одной плоскости, например, XY. Обозначим составляющие индукции и напряженности поля вдоль осей X и Y через B_x, B_y, H_x и H_y. Тогда соотношения между соответственными составляющими B и H можно записать в виде:

$$\left.\begin{aligned} B_x &= \mu_x H_x + \mu_{xy} H_y; \\ B_y &= \mu_y H_y + \mu_{yx} H_x, \end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}35)$$

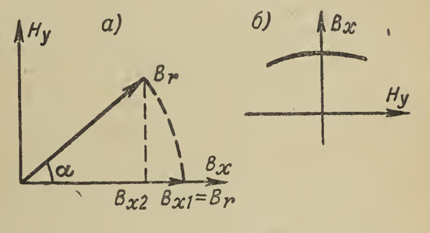


Рис. 5-14. Воздействие поперечного поля на ферромагнетик, намагниченный до насыщения: *а* — поворот вектора индукции; *б* — зависимость составляющей индукции B_x от напряженности поперечного поля H_y.

где μ_x и μ_y — так называемые собственные магнитные проницаемости по осям X и Y; μ_{xy} и μ_{yx} — взаимные магнитные проницаемости или проницаемости влияния. В изотропной среде проницаемости μ_{xy} и μ_{yx} одинаковы.

Из уравнений (5-35) ясно, что каждая из составляющих индукции зависит от обеих составляющих напряженности. Для ферромагнитных запоминающих элементов значительный интерес представляет воздействие поперечным полем на ферромагнетик, который был намагничен ранее и сохранил большую остаточную магнитную индукцию. Если ферромагнетик был намагничен в направлении оси X до насыщения, то в нем сохранилась остаточная индукция $B_{x1} = B_r$ (рис. 5-14, *а*). При воздействии на материал поперечного поля с напряженностью H_y происходит поворот вектора индукции в направлении оси Y на некоторый угол α, причем $\alpha = f(H_y)$. При этом величина вектора B_r в случае материала с идеально прямоугольной петлей гистерезиса остается неизменной. В реальных же ферромагнетиках вектор индукции одновременно с вращением может несколько возрастать по абсолютной величине, стремясь, как к пределу, к значению индукции насыщения B_s.

Однако и в этом случае, при незначительном удлинении вектора, его составляющая по оси X при вращении, очевидно, уменьшается до некоторой величины B_{x2}, являющейся функцией угла α, а следовательно, и напряженности H_y. Таким образом, с возрастанием напряженности поперечного поля происходит уменьшение составляющей остаточной индукции в продольном направлении. Зависимость $B_x = f(H_y)$ показана на рис. 5-14, *б*. Физической природе этой зависимости в материалах с ППГ может быть дано следующее упрощенное объяснение.

До воздействия поперечной напряженности H_y магнитные моменты всех доменов были направлены вдоль оси X. При воздействии напряженности H_y поперечное поле полностью повернет в направлении оси Y малые домены и частично большие. После прекращения действия поперечного поля большие домены возвращаются в начальное состояние, а малые сохраняют ориентацию вдоль оси Y. Этим объясняется, что после первого импульса H_y происходит некоторое уменьшение составляющей индукции по оси X и сохраняется небольшая составляющая индукции вдоль оси Y. Поэтому после окончания импульса вектор индукции не возвращается в начальное положение, совпадающее с осью X, а оказывается направленным под некоторым углом к оси X.

При воздействии последующих импульсов H_y магнитные моменты малых доменов будут сохранять неизменное новое направление, а магнитные моменты больших доменов будут поворачиваться на некоторый угол, а затем возвращаться в прежнее состояние. Таким образом, вектор индукции будет совершать обратимые качания, и соответственно будут происходить обратимые изменения составляющей индукции B_x.

Если разместить на элементе обмотку считывания и ориентировать плоскость ее перпендикулярно оси X, то э. д. с., индуктированная в этой обмотке, определяется скоростью изменения составляющей B_x, причем знак индуктированной э. д. с. зависит от направления существующей в ферромагнитном элементе остаточной индукции.

Другую физическую трактовку процессов неразрушающего считывания поперечным полем можно дать, исходя из представлений об изменении магнитного сопротивления магнитопровода под влиянием поперечного поля.

Рассмотрим некоторый магнитопровод, показанный на рис. 5-15, *а* и состоящий из двух участков *1* и *2* с соответствующими длинами их l_1 и l_2. Пусть в участке *2* для считывания информации создается тем или иным способом магнитное поле, вектор напряженности которого направлен перпендикулярно силовым линиям остаточного магнитного потока, замыкающимся по кольцу магнитопровода. Если элемент был ранее намагничен до насыщения, то при воздействии поперечного поля величина его остаточной индукции в участке *2* возрасти не может, будет происходить лишь поворот вектора индукции, что связано с обратимым уменьшением

остаточной индукции в продольном направлении. Это изменение индукции и вызванное им изменение величины результирующего магнитного потока можно считать следствием изменения магнитного сопротивления магнитопровода. Знак э. д. с., наведенной в обмотке считывания, определяется, очевидно, направлением остаточного потока в сердечнике, т. е. той информацией («0» или «1»), которая была в нем ранее записана.

Несколько способов практической реализации принципов неразрушающего считывания информации с ферромагнитных элементов поперечным полем были предложены еще в начале 50-х годов [5-35].

Например, на рис. 5-15, *б* показан способ возбуждения поперечного поля при помощи специального сердечника из линейного

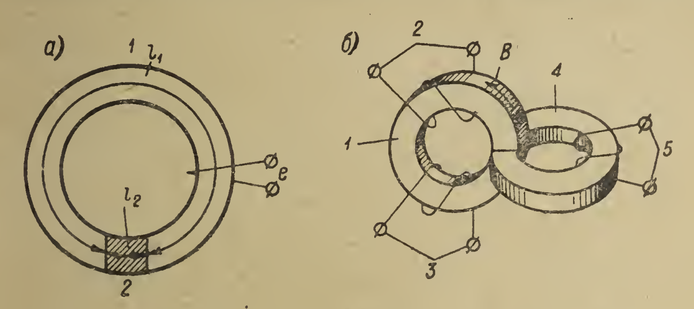


Рис. 5-15. Сердечник со считыванием информации поперечным полем: *а* — магнитопровод; *б* — способ возбуждения поперечного поля вспомогательным сердечником.

ферромагнетика *4* с обмоткой опроса *5*, расположенного в плоскости, перпендикулярной плоскости запоминающего сердечника *1*, на котором имеются обмотки записи *2* и считывания *3*.

На рис. 5-16 представлены три других варианта создания поперечного поля.

В одном случае (рис. 5-16, *а*) поперечное поле создается обмоткой, расположенной в плоскости тороидального запоминающего сердечника и охватывающей его по периметру. Естественно, что поле этой обмотки перпендикулярно основному потоку сердечника.

В другом варианте (рис. 5-16, *б*) обмотка, создающая поперечное поле, располагается внутри полого ферритового тороида, причем поле этой обмотки также всюду перпендикулярно основному потоку в запоминающем сердечнике.

Таким образом, в обоих этих вариантах рабочая зона, в которой происходит взаимодействие остаточного потока и перпендикулярного ему поперечного поля, распространена на весь сердечник, что в принципе может способствовать увеличению индуктированной э. д. с. считывания. Однако как первый, так и особенно второй варианты конструктивно сложны и поэтому практически неприемлемы.

В третьем варианте (рис. 5-16, *в*) в стенках тороидального сердечника делаются два диаметрально противоположных отверстия, ось которых перпендикулярна оси тороида. Через эти отверстия пропускается одиночный провод, расположенный в плоскости сердечника, который выполняет роль обмотки опроса, создающей поперечное поле. Однако построение ЗУ большой емкости на подобных элементах также нецелесообразно, ибо изготовление таких сердечников с отверстиями в стенках, особенно при малых размерах сердечников, чрезвычайно затруднительно, значительно удорожает сердечники и резко увеличивает процент брака.

Еще одним способом практической реализации неразрушающего считывания поперечным полем с обычных ферритовых сердечников является система, разработанная в 1959 г. в лаборатo-

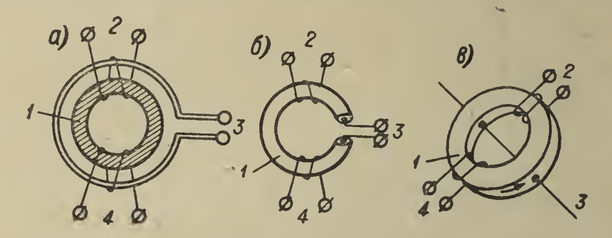


Рис. 5-16. Варианты конструкций запоминающих элементов со считыванием поперечным полем: *а* — опросная обмотка окружает запоминающий сердечник; *б* — опросная обмотка расположена внутри запоминающего сердечника; *в* — опросный провод, расположенный в плоскости сердечника, проходит через его стенки.

1 — запоминающий сердечник; *2* — обмотка записи; *3* — опросная обмотка, создающая поперечное поле; *4* — обмотка считывания.

риях фирмы «Бюрроуз» (США) и получившая название «флюкслок» [5-49]. В этой системе поперечное поле *3* создается специальной обмоткой *2*, которая размещается на сердечнике *1* (рис. 5-17, *а*) или на числовой линейке сердечников в ЗУ (рис. 5-17, *б*). В результате взаимодействия поля *3* с основным потоком сердечника изменяется составляющая потока, связанная с проводом считывания *4*, и в последнем индуктируется импульс э. д. с. считывания.

Кроме описанных конструкций, был предложен ряд других вариантов элементов со считыванием поперечным полем, например, элемент с составным магнитопроводом [5-17], ленточные сердечники с подачей импульса опроса непосредственно в ленту, из которой навит сердечник [5-35] и др. Однако из-за технических трудностей реализации и относительно низкой эффективности этих элементов они не получили широкого практического применения. Наиболее успешно зарекомендовал себя б и а к с (двухотверстный элемент), разработанный специально для считывания поперечным полем. Этот элемент будет подробнее описан в главе 7.

Другим перспективным способом неразрушающего считывания является считывание короткими импульсами, основанное на явлениях, связанных с вязкостью и упругим смещением стенок доменов в ферромагнетике. В экспериментах перемагничивания ленточных магнитных сердечников импульсами магнитного поля, амплитуда которых значительно превышала коэрцитивную силу, а длительность составляла несколько десятков наносекунд, было обнаружено, что остаточная намагниченность сердечника остается неизменной [5-43].

Варианты использования кратковременных импульсов с большой амплитудой для неразрушающего считывания рассматриваются в ряде работ. В частности, в работе [5-48] описаны эксперименты по быстрому перемагничиванию сердечников в полях с напряженностью, в полтора и более раз превышающей пороговое

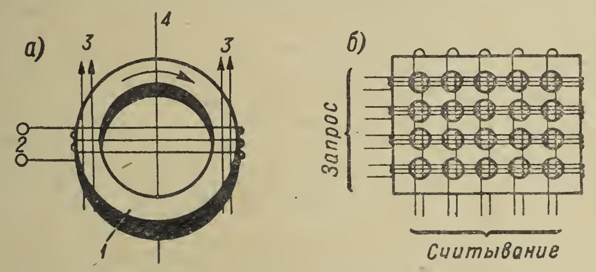


Рис. 5-17. Расположение опросной обмотки на сердечнике в системе «флюкслок»(*а*) и матрица на элементах «флюкслок» (*б*).

поле H_0, при котором начинается необратимое смещение стенок доменов. В таких больших полях основным механизмом перемагничивания становится вращение векторов намагниченности. Измерения показали, что изменение потока сердечника на 25% достигалось за 50 и 20 *нсек* при напряженностях поля $2H_0$ и $3H_0$ соответственно, а изменение потока на 50% при тех же напряженностях поля происходило за 90 и 27 *нсек*.

Идея высокочастотного неразрушающего считывания информации с ферромагнитных сердечников была выдвинута около пятнадцати лет назад [5-54]. В основе этого метода лежит использование нелинейных свойств сердечника (нелинейность гистерезисной характеристики $B = f(H)$), благодаря чему при возбуждении сердечника колебаниями одной или нескольких частот в его обмотке считывания индуктируются высшие гармоники или комбинационные частоты, фаза которых зависит от состояния сердечника, т. е. от записанной в нем информации. При этом во избежание разрушения информации необходимо выбирать частоту возбуждающего тока достаточно высокой, чтобы длительность полупериода этого тока была существенно меньше времени, необходимого для перемагничивания сердечника. Тогда в материале не успевают произойти необратимые изменения намагниченности, что позволяет

применять амплитуды напряженности поля возбуждения, в несколько раз превышающие коэрцитивную силу, не разрушая информации, записанной в сердечниках.

В 1956 г. в Японии Э. Гото предложил новый оригинальный способ частотной записи и считывания информации в ЗУ на магнитных сердечниках [5-55].

Запись информации, т. е. изменение магнитного состояния сердечника, достигается здесь воздействием на сердечник несимметричного магнитного поля с неравными отрицательными и положительными пиковыми значениями. Если у такого поля пиковые значения одной полярности будут превышать коэрцитивную силу H_c, а пиковые значения другой полярности будут меньше H_c, то за один или несколько циклов может произойти перемагничивание сердечника в направлении, определяемом полярностью преобладающих пиковых значений поля [1-11].

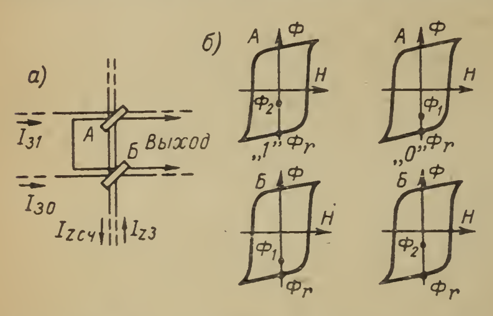


Рис. 5-18. Запоминающий элемент с перемагничиванием по частному циклу для хранения одного двоичного разряда: *а* — схема прошивки сердечников элемента; *б* — магнитное состояние сердечников для хранения «1» и «0».

Наряду с обычным методом обращения к запоминающим элементам, при котором в процессе записи или считывания информации осуществляется перемагничивание элементов по предельной гистерезисной петле, за последние годы разработан ряд методов, связанных с использованием явлений перемагничивания по частным гистерезисным циклам.

Рассмотрим один из способов практической реализации запоминающих элементов с перемагничиванием по частному циклу гистерезиса как при записи, так и при считывании информации [5-44]. Каждый запоминающий элемент, предназначенный для хранения одного двоичного разряда, содержит здесь два сердечника *А* и *Б* (рис. 5-18, *а*).

При пропускании по проводу считывания импульса тока $I_{z\,сч}$ в обоих сердечниках устанавливается остаточный поток $Ф_r$ (рис. 5-18, *б*). Запись информации осуществляется при пропускании импульса тока $I_{zз}$ и одновременно — либо тока $I_{з1}$ (при записи «1»), либо тока $I_{з0}$ (при записи «0»). При воздействии на сердечник только одного тока $I_{zз}$ остаточный поток сердечника становится равным $Ф_1$; при совместном же воздействии тока $I_{zз}$ и разрядных токов $I_{з1}$ или $I_{з0}$ ($I_{з1} = I_{з0}$) сердечник переходит в состояние $Ф_2$.

Таким образом, после записи «1» состояние сердечников характеризуется левыми графиками рис. 5-18, *б* (поток $Ф_2$ в сердечнике *А*

и Φ_1 в сердечнике $Б$), а после записи «0» — правыми графиками этого рисунка (поток Φ_1 в сердечнике A и Φ_2 в сердечнике $Б$). Амплитуды разрядных токов I_{31} и I_{30} выбраны так, что воздействие только одних этих токов практически не оказывает влияния на остаточный поток в сердечниках неизбранных запоминающих элементов.

Очевидно, что при считывании сердечниками индуктируются импульсы э. д. с. различной величины, а так как эти э. д. с. действуют навстречу друг другу, то сигналы считывания «1» и «0» на выходе получаются разнополярными.

Вопросам теории и практического применения запоминающих элементов с перемагничиванием по частным циклам посвящено значительное количество работ [5-24, 5-36, 5-39, и др.]. Применение такого режима работы позволило, в частности, создать макет ЗУ емкостью 8192 17-разрядных чисел с временем цикла 110 *нсек* [5-53].

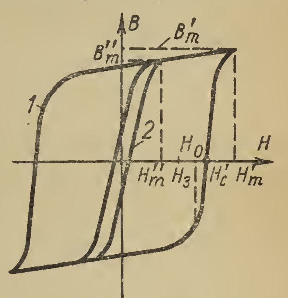


Рис. 5-19. Кривые перемагничивания образца.

1 — гистерезисная; *2* — безгистерезисная (идеальная).

В заключение рассмотрим возможность использования в запоминающих элементах перемагничивания по так называемой «идеальной» петле гистерезиса, при одновременном воздействии постоянным полем и убывающим по амплитуде переменным полем. Анализ процессов, происходящих при наложении таких полей, был проведен К. М. Поливановым [5-21]. Некоторые вопросы теории перемагничивания по идеальной петле гистерезиса, или, как его еще называют, безгистерезисного перемагничивания, и возможности использования этого явления для построения ЗУ повышенной надежности рассматривались в работах [5-14, 5-30].

Для пояснения принципиальной возможности использования явления безгистерезисного перемагничивания в запоминающих элементах рассмотрим рис. 5-19, на котором показано взаимное расположение кривых перемагничивания образца. Кривая *1* представляет собой обычную «прямоугольную» петлю гистерезиса, а кривая *2* — «безгистерезисную» кривую перемагничивания.

Величина порогового поля H'_0, при котором начинается перемагничивание сердечника в обычных условиях, значительно превышает величину поля H''_m, при которой заканчивается перемагничивание того же сердечника в условиях идеального перемагничивания. Это позволяет, очевидно, выбрать напряженность поля записи $H_з$ такой величины, что даже при значительном разбросе параметров сердечников и их температурной нестабильности будет уверенно соблюдаться неравенство: $|H''_{m\,\text{макс}}| < |H_з| < |H'_{0\,\text{мин}}|$. Тогда сердечник, к которому приложено поле $H_з$ и одновременно затухающее переменное поле, будет надежно перемагничиваться, в то время как сердечник, на который воздействует

только одно поле $H_з$, будет устойчиво сохранять свое предшествующее остаточное магнитное состояние.

Экспериментальные исследования показали, что при воздействии на сердечник переменного поля тока с частотой 50—300 *кгц* и амплитудой первого выброса 2,7 *а*, затухающего по экспоненциальному закону с логарифмическим декрементом затухания 0,1, для ферритов различных марок справедливо соотношение (рис. 5-19) $H''_m = H'_c/\alpha$, где $\alpha = 3 \div 15$. Построенный макет ЗУ с использованием безгистерезисного перемагничивания емкостью в сто чисел дал положительные результаты, причем косвенным свидетельством его надежности являлась бесперебойная работа при изменениях напряжения питания на ±50%.

Очень быстрое считывание информации с ферритовых сердечников может быть достигнуто при одновременном возбуждении их сверхвысокочастотными колебаниями. Эксперименты показали, что если включить сердечник в цепь источника колебаний с частотой 6,9—7,3 *Ггц* и опрашивать его по другому проводу очень короткими импульсами, то можно достичь скорости считывания порядка нескольких наносекунд [5-33]. Опросные импульсы изменяют состояние сердечника, приближая или удаляя его от состояния насыщения. При этом изменяется индуктивное сопротивление сердечника в цепи колебаний сверхвысоких частот, что обнаруживается детектором, включенным в эту цепь. Сигнал считывания с сердечника диаметром 1,27 *мм* достигает 10—12 *мв* при времени считывания около 15 *нсек*.

5-5. Элементы расчета сердечников и цепей, содержащих сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса

Важнейшими практическими результатами, которые должны быть получены при расчете сердечников с ППГ, работающих в режиме запоминающих элементов, являются: время перемагничивания; величина сигнала считывания и характер ее изменений во времени в процессе перемагничивания; мощность потерь в сердечнике при перемагничивании; эквивалентное сопротивление сердечника.

При определении указанных величин нужно учитывать параметры самого сердечника (характеристики материала и размеры сердечника), характеристики источника тока и цепи перемагничивания (первичной цепи), а также влияние нагрузки сердечника (характеристики вторичных цепей).

Для определения времени перемагничивания сердечника можно пользоваться приведенным выше выражением (5-32) или более точными выражениями [1-11], учитывающими изменение формы перемагничивающего поля во времени.

Абсолютная величина сигнала считывания в одновитковой обмотке

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = S\,\frac{dB}{dt}. \qquad (5\text{-}36)$$

В простейшем случае, предполагая, что перемагничивание происходит с постоянной скоростью, можно пользоваться выражением:

$$e = S\frac{\Delta B}{\tau}, \qquad (5\text{-}37)$$

или, полагая, что сердечник перемагничивается из состояния $+B_r$ в состояние $-B_m$, выражением:

$$e = S\frac{B_r + B_m}{\tau} \approx S\frac{2B_r}{\tau}, \qquad (5\text{-}38)$$

где τ — время перемагничивания.

Фактически закон изменения э. д. с. считывания e во времени значительно сложнее вследствие влияния сложной формы импульса перемагничивающего тока и нелинейных свойств ферромагнетика. Ряд выражений для вычисления э. д. с. считывания, более или менее точно учитывающих все стороны сложного процесса перемагничивания сердечника, приведены в [1-11, 5-3, 5-4, 5-18, 5-20 и др.].

Рассмотрим теперь некоторые энергетические соотношения. Если под воздействием магнитного поля с напряженностью H ферромагнетик перемагничивается из состояния, которое характеризовалось некоторой величиной магнитной индукции B_1, в состояние, которое характеризуется магнитной индукцией B_2, то при перемагничивании затрачивается энергия

$$W = V\int_{B_1}^{B_2} H\,dB, \qquad (5\text{-}39)$$

где V — объем перемагничиваемого ферромагнетика.

Объем V_c тороидального сердечника с внешним диаметром D, внутренним диаметром d и высотой h

$$V_c = \frac{\pi}{4}h(D^2 - d^2); \qquad (5\text{-}40)$$

тогда

$$W_c = \frac{\pi h}{4}(D^2 - d^2)\int_{B_1}^{B_2} H\,dB. \qquad (5\text{-}41)$$

При медленном перемагничивании ферритового сердечника с ППГ из состояния $-B_r$ в состояние $+B_r$ под воздействием постоянной напряженности поля $H = H_c$ можно в первом приближении считать, что

$$\int_{-B_r}^{+B_r} H\,dB \approx 2B_r H_c. \qquad (5\text{-}42)$$

Тогда выражение (5-41) можно переписать в виде:

$$W_c \approx \frac{\pi h}{2}(D^2 - d^2)B_r H_c. \qquad (5\text{-}43)$$

При перемагничивании сердечника в импульсном поле с напряженностью H_m энергия, затрачиваемая на перемагничивание, определяется площадью динамической петли гистерезиса и достигает наибольшего значения $W_{с.\,макс}$ при скачкообразном изменении напряженности магнитного поля [1-18]. При этом

$$\int\limits_{-B_r}^{+B_r} H_m\, dB = 2B_r H_m; \qquad (5\text{-}44)$$

$$W_{с.\,макс} = \frac{\pi h}{2}(D^2 - d^2)\, B_r H_m. \qquad (5\text{-}45)$$

Если энергию $W_с$, вычисленную по формуле (5-43), можно считать равной потерям на гистерезис, то энергию $W_{с.\,макс}$ (5-45) можно представить как полную энергию потерь, обусловленных гистерезисом, магнитной вязкостью и вихревыми токами.

Энергия потерь при перемагничивании выделяется в виде тепла и при большой частоте перемагничивания может привести к заметному нагреванию сердечников. Ввиду существенной зависимости магнитных свойств ферритов от температуры это может явиться причиной значительного изменения характеристик ферритовых запоминающих и переключающих элементов. Поэтому потерями при перемагничивании, с одной стороны, и условиями отвода выделяемого тепла, с другой стороны, в основном определяется максимально допустимая частота обращения к ЗУ на ферритовых сердечниках.

Теплоотдачу элемента в окружающую среду можно считать, в первом приближении, пропорциональной поверхности этого элемента. Простые выкладки, относящиеся к вопросам естественной теплоотдачи ферритовых сердечников [1-11] позволяют сделать заключение, что для улучшения теплового режима сердечников, а следовательно, и для повышения допустимых рабочих частот нужно уменьшать величину $(D - d)$, т. е. толщину стенок сердечников.

При рассмотрении режима перемагничивания сердечника в предшествующих параграфах не учитывалось влияние нагрузки, включенной в его выходную обмотку. Такое допущение оправдано при анализе работы ферромагнитных сердечников в качестве запоминающих элементов, поскольку от них требуется получение импульсов напряжения, подаваемых на усилители с высокоомным входом. Однако в случае работы их в качестве нагруженных переключающих элементов, например в качестве магнитных ключей координатных дешифраторов ЗУ с непосредственной выборкой или в регистрах сдвига, к выходному импульсу, снимаемому с сердечника, предъявляются требования обеспечения определенного тока и отдачи определенной мощности, достаточных для перемагничивания одного или нескольких других сердечников. Кроме того, при очень малой мощности сигналов, например, при считывании с микроминиатюрных сердечников, нельзя не учитывать потерь

при распространении сигнала считывания по длинной разрядной шине от избранного сердечника до входа усилителя считывания.

Рассмотрим некоторые вопросы теории процессов в сердечнике с произвольным количеством нагруженных выходных обмоток, следуя методике, предложенной В. Ф. Белявским и К. М. Поливановым [5-6].

Изменения во времени напряженности магнитного поля $H = f(t)$ определяются суммарной величиной намагничивающего тока $\Sigma i = f(t)$ и средней длиной сердечника l.

Таким образом, в общем случае

$$H = \frac{iw}{l} - \sum_{k=1}^{n} \frac{i_k w_k}{l}, \qquad (5\text{-}46)$$

где i — ток во входной (намагничивающей) обмотке сердечника; w — количество витков входной обмотки; i_k — ток в k-й выходной обмотке сердечника; w_k — количество витков k-й обмотки.

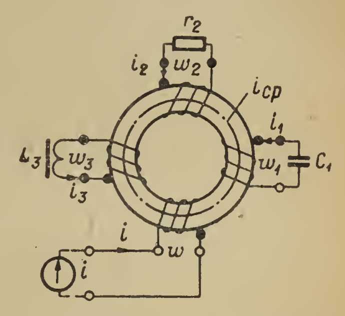


Рис. 5-20. Схема электрической цепи сердечника с тремя нагруженными выходными обмотками.

Рассмотрим схему электрической цепи сердечника (рис. 5-20) с одной входной и тремя нагруженными выходными обмотками. Предположим, что параметры нагрузок C_1, r_2 и L_3 постоянны, а также допустим, что закон изменения во времени намагничивающего тока i известен.

Пусть начальное магнитное состояние сердечника характеризуется остаточной индукцией $-B_r$. Тогда напряженность поля в сердечнике

$$H = \frac{iw}{l} - \frac{S}{l} \cdot \frac{w_2^2}{r_2} \cdot \frac{dB}{dt} - \frac{S}{l} \cdot \frac{w_3^2}{L_3}(B_r + B) - \frac{S}{l} w_1^2 C_1 \frac{d^2B}{dt^2}, \qquad (5\text{-}47)$$

где S — сечение сердечника.

Введем следующие обозначения:

$$H_{\text{вх}} = \frac{iw}{l}; \qquad (5\text{-}48)$$

$$G_2 = \frac{S}{l} \cdot \frac{w_2^2}{r_2}; \qquad (5\text{-}49)$$

$$b_3 = \frac{S}{l} \cdot \frac{w_3^2}{L_3}; \qquad (5\text{-}50)$$

$$c_1 = \frac{S}{l} w_1^2 C_1, \qquad (5\text{-}51)$$

и подставим их в уравнение (5-47), которое примет вид:

$$H = H_{\text{вх}} - G_2 \frac{dB}{dt} - b_3(B_r + B) - c_1 \frac{d^2B}{dt^2}. \qquad (5\text{-}52)$$

Представим уравнение (5-27) в виде:

$$H - H_0 = \frac{1}{r(B)} \cdot \frac{dB}{dt}. \qquad (5\text{-}53)$$

Подставляя (5-52) в (5-53) и выполняя простейшие преобразования, получим:

$$H_{\text{вх}} - H_0 = c_1 \frac{d^2B}{dt^2} + \left[\frac{1}{r(B)} + G_2\right] \frac{dB}{dt} + b_3 (B_r + B). \qquad (5\text{-}54)$$

Выражение (5-54) легко распространить на общий случай сердечника с произвольным количеством выходных обмоток, нагруженных линейными сопротивлениями различного характера.

Например, для частного случая, когда все n выходных обмоток сердечника нагружены активными линейными сопротивлениями, уравнение (5-54) принимает вид:

$$H_{\text{вх}} - H_0 = \left[\frac{1}{r(B)} + \sum_{k=1}^{n} G_k\right] \frac{dB}{dt}. \qquad (5\text{-}55)$$

Наконец, в еще более простом, но весьма распространенном случае, когда на сердечнике имеется одна выходная обмотка, нагруженная активным сопротивлением, уравнение (5-55) еще упрощается:

$$H_{\text{вх}} - H_0 = \left[\frac{1}{r(B)} + G_2\right] \frac{dB}{dt}. \qquad (5\text{-}56)$$

Полученные выражения позволяют достаточно точно произвести расчет схемы нагруженного сердечника в динамике процесса перемагничивания.

Однако для практических целей можно использовать упрощенную, хотя и весьма приближенную, методику расчета процессов в схеме с нагруженным сердечником с ППГ [5-34].

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ФЕРРИТОВЫХ СЕРДЕЧНИКАХ

6-1. Общие принципы построения запоминающих устройств на ферритовых сердечниках

Как указывалось выше (см. § 5-1), одним из простейших вариантов осуществления выбора (селекции) некоторого определенного запоминающего элемента из большого числа элементов в ЗУ значительной емкости является применение принципа совпадения токов. Там же, на рис. 5-4, была представлена схема матрицы, состоящей из четырех запоминающих элементов, выбираемых по этому принципу, и рассмотрены некоторые элементарные вопросы, связанные с особенностями работы элементов в таких схемах.

Однако, если по принципу рис. 5-4 построить ЗУ, предназначенное для хранения многоразрядных чисел, то, поскольку в момент

совпадения полутоков в любой паре селектирующих шин (горизонтальной и вертикальной) может быть записана или считана только одна двоичная цифра, запись или считывание всего числа потребует столько тактов работы, сколько разрядов содержится в числах.

Поэтому в ЗУ большой емкости с совпадением токов и с параллельной записью и считыванием информации, для хранения каждого разряда всех чисел применяется отдельная матрица — **разрядная плата**. Эта матрица имеет чаще всего квадратную форму и содержит столько сердечников, сколько чисел должно фиксироваться в ЗУ. Сердечники располагаются рядами на пересечениях горизонтальных и вертикальных шин.

Ряд сердечников вдоль горизонтальной оси X разрядной платы носит название **строки**, а ряд сердечников, расположенных вдоль вертикальной оси Y, — **столбца** плоской матрицы (разрядной платы).

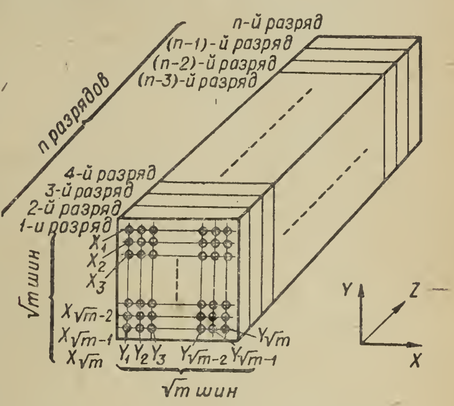


Рис. 6-1. Схематический вид блока памяти (накопителя) с совпадением токов.

Разрядные платы собираются в общий блок — **накопитель**, называемый часто **кубом памяти**. Схематический вид такого блока ЗУ представлен на рис. 6-1. Емкость этого ЗУ составляет m чисел по n разрядов каждое. Соответственно, изображенный куб памяти состоит из n-разрядных плат, каждая из которых содержит m сердечников, прошитых селектирующими шинами. Общее количество селектирующих шин равно, очевидно, $2\sqrt{m}$ ($\sqrt{m}$ шин, расположенных вдоль строк, и $\sqrt{m}$ шин, расположенных вдоль столбцов матрицы).

Принципиальная схема соединений внутри одной из разрядных плат такого ЗУ приведена на рис. 6-2. При этом, поскольку монтаж платы при изменении ее емкости остается в принципе неизменным, здесь для упрощения рисунка изображена матрица из 16 сердечников; ЗУ с такими разрядными платами пригодно, очевидно, для хранения 16 чисел, разрядность которых определяется количеством плат, содержащихся в блоке памяти ЗУ.

К шинам разрядной платы подводится восемь селектирующих проводов, предназначенных для выбора нужного запоминающего элемента. Четыре провода подключаются к зажимам шин X_1, X_2, X_3, X_4 и четыре — к зажимам шин Y_1, Y_2, Y_3, Y_4. Горизонтальная шина X_1 пронизывает все сердечники первой строки первой разрядной платы, затем последовательно соединяется с шиной X_1

второй разрядной платы, которая пронизывает все сердечники ее первой строки, идет к третьей разрядной плате и так далее и, пройдя, наконец, все сердечники первой строки n-й платы, заземляется.

Аналогичным образом монтируются и все остальные горизонтальные (X) и вертикальные (Y) селектирующие шины. Следовательно, посылая совпадающие по знаку и во времени импульсы с амплитудой $I_m/2$ по любой паре, включающей одну горизонтальную и одну вертикальную шины, можно обеспечить перемагничивание в то или иное состояние всех находящихся в одном и том же месте n сердечников во всех n разрядных платах. Эти сердечники, расположенные в ряд вдоль оси Z куба памяти (рис. 6-1), образуют ячейку ЗУ, предназначенную для записи одного n-разрядного числа. Так, например, если подать положительные импульсы с амплитудой $I_m/2$ на входы X_3 и Y_2 (рис. 6-2), то во всех n разрядных платах ЗУ избранные сердечники *10* перейдут в состояние положительной намагниченности, т. е. в ячейке № 10 во всех ее n разрядах будет записан код «1».

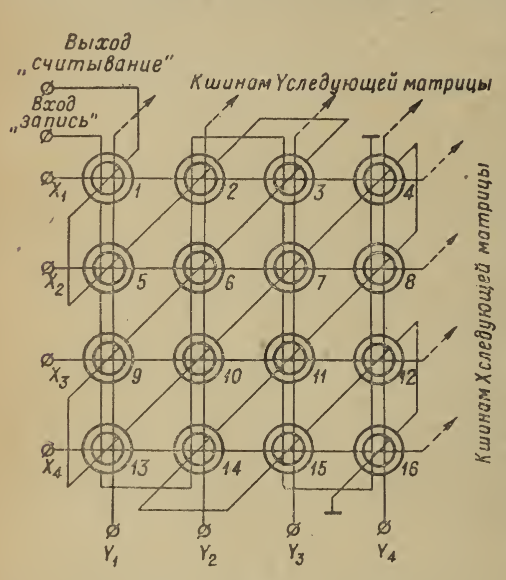


Рис. 6-2. Схема прошивки разрядной платы ЗУ с совпадением токов (трехмерного ЗУ).

Для управления записью и для считывания кодов соответствующих разрядов чисел в каждой разрядной плате содержатся обмотки (провода) записи и считывания, имеющие внешние зажимы. К зажиму «вход» платы выведен провод записи, которым все сердечники данной разрядной платы пронизаны так, что при возбуждении прóвода записи на них действует поле одинакового направления. В этот провод или обмотку при записи в данном разряде единицы никакой ток не подается. Тогда, под влиянием токов в селектирующих шинах, избранный сердечник перемагничивается в положительное состояние, что соответствует записи в нем кода «1».

Если в данном разряде должен быть записан нуль, то ко входу разрядной платы подводится отрицательный импульс тока с амплитудой $I_m/2$, компенсирующий половину напряженности поля, создаваемого в избранном сердечнике положительными импульсами селектирующих шин. Благодаря этому избранный сердечник

остается в начальном состоянии отрицательной намагниченности, соответствующем записи в нем кода «0». Таким образом, запись информации («1») в описываемой схеме осуществляется по сути дела положительными импульсами в селектирующих шинах, а ток в обмотке записи используется лишь для предотвращения или запрета записи «1», если в данном разряде должен быть записан «0». Поэтому более точно обмотку записи часто называют обмоткой запрета записи или сокращенно обмоткой запрета. Эта же обмотка может использоваться и для съема сигналов считывания информации.

Таким образом, в ЗУ с совпадением токов запоминающие элементы выполняют не только функцию собственно хранения информации, но и простейшие логические операции. Так, в режиме считывания запоминающий элемент реализует логическую операцию конъюнкции — совпадения двух адресных полутоков, а в режиме записи — конъюнкции трех логических переменных: двух адресных полутоков и тока запрета. Это обусловливает принципиальное требование прошивки каждого сердечника по крайней мере тремя проводами—двумя селектирующими и одним записи-считывания. Поэтому ЗУ с совпадением токов, или как их еще иногда называют, ЗУ с разрядной организацией, сейчас все чаще называют трехмерными ЗУ или сокращенно — ЗУ типа 3Д (от англ. «three-dimensional»). Наименованием трехмерное ЗУ мы и будем пользоваться в дальнейшем изложении.

Практически, однако, в трехмерных ЗУ редко используются общие провода записи-считывания. Несмотря на усложнение монтажа это диктуется следующими двумя соображениями.

Во-первых, при использовании общего провода к нему должны быть подключены и формирователь тока запрета, и усилитель считывания. При этом довольно мощный импульс тока запрета попадает на вход усилителя считывания, после чего требуется некоторое время восстановления чувствительности усилителя, чтобы он мог воспринять слабые сигналы считывания. Это, естественно, снижает быстродействие ЗУ. Правда, можно было бы на время такта записи отключать усилитель, но это привело бы к усложнению схемы и, в свою очередь, к снижению быстродействия.

Во-вторых, помехи, возникающие в такте считывания в полуизбранных сердечниках (см. § 5-1), суммируясь, создавали бы на входе усилителя считывания напряжение, значительно превышающее полезный сигнал, что сделало бы практически невозможным считывание информации из ЗУ. Поэтому для съема сигналов обычно используется специальная обмотка считывания, также пронизывающая все сердечники платы. Однако схема прошивки сердечников этим проводом такова, что если рассмотреть любую пару расположенных рядом в строке или в столбце сердечников, то окажется, что обмотка считывания пронизывает их в противоположных

направлениях. Таким образом, половина всех сердечников в разрядной плате пронизана проводом считывания в одном направлении, а половина — в другом. Если предположить, что все сердечники совершенно идентичны, то помехи, возникающие при считывании от возбуждения полуизбранных сердечников, вследствие непрямоугольности их петли гистерезиса будут взаимно компенсироваться.

Однако компенсация эта будет неполной как вследствие разброса параметров сердечников, так и вследствие неравенства в каждом конкретном случае количеств сердечников, находящихся в состоянии положительной и отрицательной намагниченности, и неодинаковости возбуждаемых помех. Поэтому на практике помехи, возникающие при считывании информации, существенно влияют на надежность работы ЗУ.

Наряду с различными мерами, предложенными для повышения помехозащищенности трехмерных ЗУ, значительного снижения помех при считывании можно добиться, применяя так называемую *двухмерную* схему ЗУ, или, как его еще называют, ЗУ *с непосредственной выборкой* или *с числовой (словарной) организацией*.

Основная особенность этой схемы состоит в том, что в ней при считывании информации импульс тока с амплитудой, достаточной для перемагничивания сердечников, воздействует одновременно на все сердечники только выбранной числовой ячейки, в которой хранится подлежащее считыванию число. Все же остальные запоминающие сердечники при считывании не подвергаются воздействию импульсов возбуждения.

Это позволяет применять при считывании форсированные режимы, т. е. перемагничивать сердечники избранной ячейки импульсами тока большой амплитуды, создающими напряженность поля, существенно превышающую коэрцитивную силу. Так как считывающий ток не проходит по обмоткам сердечников других, неизбранных, ячеек, то, несмотря на его большую величину, отсутствует опасность разрушения информации в неизбранных ячейках, и не возникает э. д. с. помех за счет частичного возбуждения неизбранных сердечников.

Кроме того, применение форсированного перемагничивания позволяет ускорить процесс считывания информации, а значит, и уменьшить время полного цикла обращения к ЗУ. При форсированном режиме считывания обеспечивается также бóльшая амплитуда выходного сигнала. Значительное снижение помех при считывании позволяет существенно упростить цепи считывания и повышает надежность работы ЗУ. Наконец, к идентичности параметров сердечников в ЗУ с непосредственной выборкой предъявляются менее жесткие требования, чем в ЗУ с совпадением токов. Поэтому при отбраковке полезный выход сердечников оказывается здесь больше, что положительно сказывается на экономических показателях при изготовлении ЗУ.

Принцип построения ЗУ с непосредственной выборкой можно уяснить из рассмотрения упрощенной схемы одной платы (матрицы) ЗУ, представленной на рис. 6-3. Каждый столбец образует одну запоминающую ячейку, предназначенную для хранения одного n-разрядного (в данном случае пятиразрядного) числа. Разрядность чисел определяется количеством сердечников в ячейке и, следовательно, в рассматриваемой схеме количеством строк в плате. Все сердечники каждого столбца пронизаны числовыми селектирующими проводами или шинами Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4, количество которых равно количеству чисел в данной плате. Возбуждением соответствующей числовой шины Z осуществляется выбор запоминающей ячейки (числового регистра), в который должна быть произведена запись или считывание кода числа.

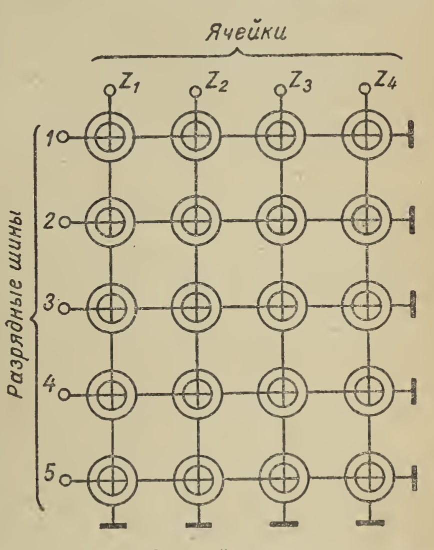


Рис. 6-3. Простейшая схема платы ЗУ с непосредственной выборкой (двухмерного ЗУ).

Все сердечники каждой строки матрицы прошиты разрядными шинами *1*, *2*, *3*, *4* и *5* (в общем случае количество разрядных шин равно n). Эти шины могут быть использованы в качестве разрядных проводов записи, а также и проводов считывания. При этом для записи информации можно использовать принцип совпадения токов в числовых шинах Z и разрядных шинах. При считывании же соответствующую шину Z можно возбудить током принципиально неограниченной величины, который перемагничивает все сердечники избранной числовой ячейки в состояние «0», причем в соответствующих разрядных обмотках индуктируются э. д. с., снимаемые с зажимов шин *1*, *2*, ..., *5*. Таким образом, в описываемом ЗУ каждый сердечник принципиально требует прошивки по крайней мере двумя проводами, что и обусловило название — двухмерное ЗУ (ЗУ типа 2Д).

При практическом выполнении двухмерного ЗУ часто вместо одной разрядной шины используются раздельные разрядные шины, одна из которых предназначается для записи информации, а вторая выполняет роль обмотки считывания.

Размещение запоминающих элементов (сердечников), образующих числовую ячейку, возможно либо в одной плоской матрице, как на рис. 6-3, либо в различных разрядных платах, подобно тому, как это сделано в трехмерном ЗУ, изображенном на рис. 6-1.

Одной из трудностей, связанных с созданием двухмерных ЗУ, является необходимость обеспечить внешний (вне запоминающей матрицы) выбор необходимой числовой ячейки, что требует наличия индивидуального селектирующего элемента (вентиля, ключа) на каждое число. Это существенный недостаток двухмерных ЗУ по сравнению с трехмерными, в которых селекция соответствующих запоминающих элементов осуществляется внутри запоминающей матрицы в самих запоминающих элементах. Таким образом, функции запоминания и селекции в трехмерном ЗУ оказываются в значительной степени совмещенными в одних и тех же элементах, тогда как в двухмерных ЗУ эти функции при считывании информации полностью разделены, а при записи, производимой по методу совпадения токов, разделены лишь частично.

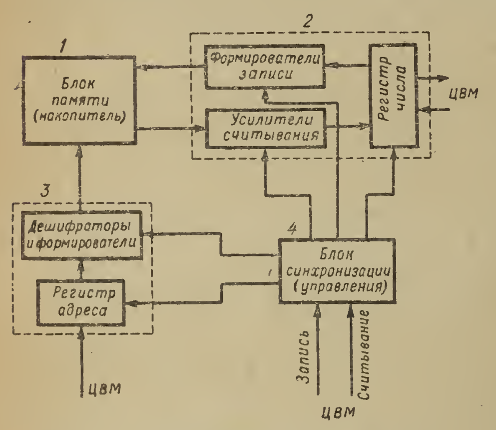


Рис. 6-4. Упрощенная блок-схема ЗУ.

В силу указанных обстоятельств количество селектирующих элементов будет значительно бо́льшим в случае применения двухмерных ЗУ большой емкости, чем трехмерных ЗУ такой же емкости. Этот недостаток в значительной мере преодолен в схеме ЗУ, занимающем по своим свойствам и организации промежуточное место между двухмерными и трехмерными ЗУ и получившим соответственно условное название $2^1/_2$-мерного ЗУ (ЗУ типа $2^1/_2$Д). Это ЗУ описывается ниже в § 6-4.

Основные вопросы, рассмотренные в данном параграфе, сводились к организации (схеме и принципу действия), запоминающей части (накопителя) ЗУ. Однако наряду с этим блоком, где осуществляется собственно хранение информации, важными частями ЗУ являются и другие блоки, обслуживающие накопитель.

Рассмотрим блок-схему ЗУ, изображенную на рис. 6-4. Кроме основной части — накопителя *1*, в котором сосредоточены запоминающие элементы, выполняющие функции хранения информации, к ЗУ относятся еще следующие три важные части: с х е м а з а п и с и - с ч и т ы в а н и я чисел (р а з р я д н а я схема) *2*, а д р е с н а я с х е м а *3* и б л о к с и н х р о н и з а ц и и или м е с т н о г о у п р а в л е н и я *4*.

Схема записи-считывания чисел в ЗУ является промежуточным звеном, в котором происходит обмен информацией между накопителем и остальными блоками кибернетического устройства (в частном случае — цифровой вычислительной машины ЦВМ). Число, предназначенное для ввода и фиксации в ЗУ, поступает в числовой

регистр, где находится на кратковременном хранении до осуществления записи его в накопителе. Кодовые импульсы записываемого числа усиливаются и формируются специальными схемами и подаются в нужные моменты в обмотки записи накопителя. Кодовые импульсы считываемых чисел также подвергаются усилению, стробированию, дискриминации (различению «0» и «1») и поступают в числовой регистр, где коды чисел хранятся кратковременно до отсылки их в машину и до конца цикла регенерации. Весь этот комплекс схем усилителей, формирователей, ключей и регистр чисел можно отнести к схеме записи-считывания.

Кроме того, при каждом обращении к ЗУ в него из обслуживаемой им кибернетической системы должна поступить информация о том, в какую ячейку накопителя нужно поместить записываемое число, или из какой ячейки его нужно извлечь при считывании. Эти указания поступают в ЗУ из машины в виде адреса, т. е. числового кода, соответствующего номеру ячейки, к которой происходит обращение.

Адрес записывается в адресном регистре, и затем, в соответствии с кодом адреса, осуществляется выбор селектирующих шин блока памяти и возбуждения их в определенные моменты времени импульсами тока заданной амплитуды и длительности. Связанные с этими процессами функции выполняются так называемыми *дешифраторами адресов*, *формирователями* и *усилителями* селектирующих импульсов и соответствующими *ключевыми* схемами.

Управление всеми процессами записи и считывания информации в ЗУ и согласование во времени последовательности действия отдельных блоков памяти внутри ЗУ осуществляется *блоком синхронизации*. В этот блок из машины поступают сигналы — указания о характере предстоящей операции — «запись» или «считывание». В соответствии с этими указаниями блок синхронизации вырабатывает соответствующие импульсы управления регистрами, ключевыми схемами, дешифраторами и другими элементарными блоками схемы записи-считывания чисел и адресной схемы ЗУ. Подробнее схемы дешифраторов, усилителей и некоторые другие элементы *электронных схем управления* (так называемое *периферийное оборудование* ЗУ) будут рассмотрены в гл. 15.

6-2. Трехмерные запоминающие устройства

Из сказанного в предыдущем параграфе видно, что в типичном трехмерном ЗУ каждый сердечник обычно прошит четырьмя обмотками: двумя селектирующими, обмоткой считывания и обмоткой запрета. Селектирующие обмотки по строкам и столбцам всех разрядных плат соединены последовательно. Обмотки считывания и запрета проходят через все сердечники одной платы.

На рис. 6-5 изображена наглядная схема прошивки системы матриц, образующей куб памяти трехмерного ЗУ.

На рис. 6-6 представлена временна́я диаграмма работы трехмерного ЗУ. Полный цикл $t_ц$ обращения к ЗУ слагается из двух

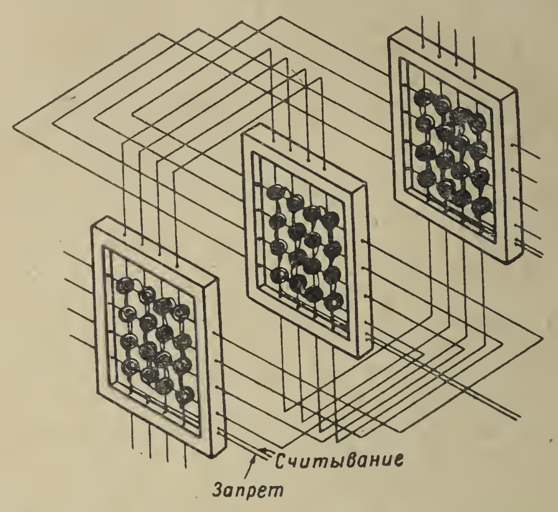


Рис. 6-5. Схема соединений разрядных матриц трехмерного ЗУ.

частей: времени считывания $t_{сч}$ и времени записи или регенерации информации $t_з$. Импульсы токов возбуждения селектирующих шин с амплитудой I_x и I_y имеют отрицательную полярность при считывании и положительную полярность при записи информации.

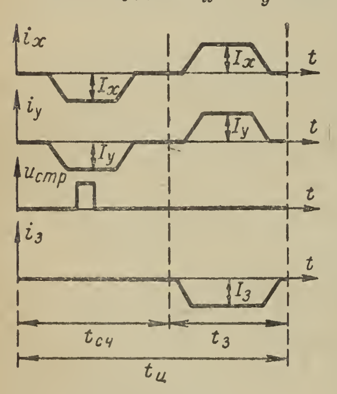


Рис. 6-6. Временна́я диаграмма работы трехмерного ЗУ.

Для улучшения условий распознавания сигнала на фоне помех осуществляется стробирование выходного сигнала, которое заключается в том, что ключи на выходе усилителей считывания открываются импульсом $U_{стр}$ на короткое время, соответствующее максимальной величине отношения полезного сигнала к помехе.

Управление записью нужного кода («0» или «1») производится импульсом запрета записи с амплитудой $I_з$, который подается в обмотку запрета только при записи нуля и имеет несколько бо́льшую длительность, чем селектирующие импульсы I_x и I_y.

Рассмотрим вопрос о соотношении амплитуд импульсов и о допусках на отклонения этих амплитуд от нормы.

Обозначим через I_m минимальный ток, обеспечивающий полное переключение сердечника, и через $I_п$ — максимальное (пороговое) значение тока, при котором еще не происходит переключения. Будем считать, что после прекращения импульса тока с амплитудой $I_п$ сердечник возвращается в состояние, в котором он находился до воздействия этого импульса, а под влиянием импульса с амплитудой, бо́льшей I_m, сердечник надежно перемагничивается и после прекращения импульса сохраняет новое состояние. Следовательно, суммарное значение токов в селектирующих шинах $I_x + I_y$, которое должно обеспечивать перемагничивание сердечников при записи и считывании информации, должно быть не менее I_m. Так как токи I_x и I_y обычно берутся одинаковыми, то это условие можно записать в виде:

$$I_x + I_y = 2I_x \geqslant I_m. \tag{6-1}$$

Номинальный ток запрета $I_з$ обычно выбирается равным току в селектирующей шине:

$$I_з \approx I_x. \tag{6-2}$$

В наиболее неблагоприятных случаях отклонений амплитуд импульсов от номинала для нормальной работы ЗУ должны соблюдаться следующие условия.

При записи «0», чтобы избранный сердечник перемагнитился в состояние «1», необходимо соблюдать соотношения:

$$2I_{x\,макс} - I_{з.мин} \leqslant I_п. \tag{6-3}$$

В то же время, чтобы ток запрета не разрушил состояния «1» неизбранных сердечников, должно удовлетворяться условие:

$$I_{з.\,макс} \leqslant I_п. \tag{6-4}$$

Наконец, предельная амплитуда тока в селектирующей шине

$$I_{x\,макс} \leqslant I_п. \tag{6-5}$$

Обозначим через δ и ε допустимые относительные отклонения токов I_x и $I_з$ от номинальных значений:

$$\delta = \frac{I_{x\,макс} - I_x}{I_x} = \frac{I_x - I_{x\,мин}}{I_x}; \tag{6-6}$$

$$\varepsilon = \frac{I_{з.\,макс} - I_з}{I_з} = \frac{I_з - I_{з.\,мин}}{I_з}. \tag{6-7}$$

Тогда, исходя из выражений (6-1), (6-3), (6-4) и (6-5), для случая максимальных допусков можно написать следующие соотношения:

$$2(1-\delta) I_x = I_m; \tag{6-8}$$

$$2(1+\delta) I_x - (1-\varepsilon) I_з = I_п; \tag{6-9}$$

$$(1+\varepsilon) I_з = I_п; \tag{6-10}$$

$$(1+\delta) I_x = I_п - \varepsilon I_з. \tag{6-11}$$

Последнее уравнение (6-11), полученное из (6-9) и (6-10), показывает, что условие (6-5) удовлетворяется автоматически, если выполнены условия (6-3) и (6-4).

Введем обозначение

$$\alpha = \frac{I_m}{I_п}. \tag{6-12}$$

Коэффициент α, очевидно, является параметром сердечника.

Если разделить уравнение (6-11) на (6-8), то с учетом (6-10) и (6-12) получим соотношение:

$$\frac{1+\delta}{1-\delta}\alpha - \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon} = 1. \tag{6-13}$$

Уравнением (6-13) определяется взаимная зависимость допусков на токи управления ЗУ при различных величинах параметра α, характеризующего используемые в ЗУ сердечники. Практически величина α колеблется в пределах от 1,5 до 2,0, причем для большинства типов сердечников ее можно принять равной примерно 1,6.

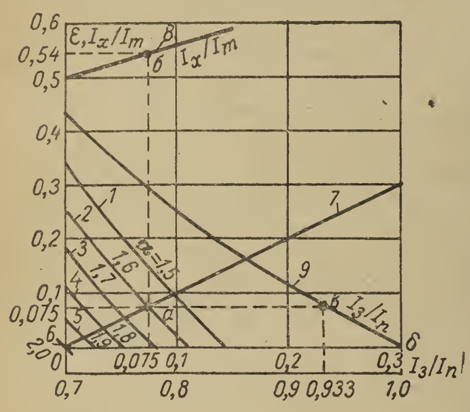


Рис. 6-7. Графики соотношения между управляющими токами и допусками на них в трехмерных ЗУ.

На рис. 6-7 изображено семейство кривых, построенных по уравнению (6-13) для различных значений α (кривые 1-6). По этим кривым можно графическим путем определять допуски токов возбуждения селектирующих шин (δ) и токов запрета (ε) по известным для заданного сердечника значениям параметра α.

В той же системе координат вычерчены дополнительно следующие три графика: 1) линия равных допусков δ и ε (кривая *7*); 2) график отношения $I_x/I_m = f(\delta)$ (кривая *8*), построенный по уравнению (6-8). Этот график позволяет определять отношение I_x/I_m как функцию от допусков на токи возбуждения в селектирующих шинах; 3) график отношения $I_з/I_п = f(\varepsilon)$ (кривая *9*), построенный по уравнению (6-10). Пользуясь этим графиком, можно определить отношение $I_з/I_п$ как функцию допуска на ток в обмотке запрета записи.

Рассмотрим пример использования графиков рис. 6-7. Пусть сердечники, примененные в ЗУ, характеризуются параметром $\alpha = 1{,}6$ и пусть требования с точки зрения допусков к формирователям импульсов токов возбуждения селектирующих шин и тока

запрета одинаковы, т. е. $\delta = \varepsilon$. Тогда, проецируя точку *а* пересечения кривых *2* и *7* на оси координат, определим значения относительных допусков: $\delta = \varepsilon = 0{,}075$. Проецируя далее точку *а* на кривые *8* и *9*, получим соответственно точки *б* и *в*. Проецируя точку *б* на ось ординат, по которой в том же масштабе, что и ε, отложено отношение I_x/I_m, получаем величину этого отношения, равную 0,54. Проекция точки *в* на ось со шкалой $I_з/I_п$, параллельную оси абсцисс, дает значение отношения $I_з/I_п = 0{,}933$.

Таким образом, по рассмотренным уравнениям и соответствующим графикам могут быть определены основные данные для проектирования источников управляющих импульсов трехмерного ЗУ.

Рассмотрим теперь вопрос о помехоустойчивости трехмерных ЗУ. Если бы можно было построить ЗУ на сердечниках с идеальной ППГ, то при считывании информации из него не возникло бы никаких помех. В реальных же сердечниках, вследствие неидеальной прямоугольности петли гистерезиса, воздействие напряженности поля любой величины вызывает более или менее существенное изменение их магнитного состояния, и, значит, в обмотке считывания индуктируется э. д. с., которая является помехой, накладывающейся на полезный сигнал и ухудшающей распознаваемость считываемой информации.

Данные вопросы были кратко рассмотрены в § 5-1, где были также изображены кривые э. д. с. считывания «1» и «0» (см. рис. 5-3). Вторые (на рисунке — отрицательные) импульсы помехи на этих кривых возникают позднее полезного сигнала считывания. Следовательно, эти помехи можно легко устранить стробированием в усилителе считывания.

Однако первый импульс помехи при считывании «0» совпадает во времени с полезным сигналом и имеет одинаковую с ним полярность. Правда, и в этом случае различение «1» и «0» представляло бы относительно простую задачу благодаря значительной разнице амплитуд соответствующих э. д. с. Но как при считывании «1», так и при считывании «0» в качестве источников помех действует еще большое количество полувозбужденных сердечников, помехи которых при суммировании могут достигнуть такой большой величины, что распознавание считанной информации окажется невозможным. Эта проблема является решающей при оценке работоспособности ЗУ с совпадением токов и поэтому требует более детального рассмотрения.

На рис. 6-8 схематически показано расположение возбужденных и полувозбужденных сердечников в матрице 4×4 при различных случаях обращения к сердечнику 23. Полностью возбужденный сердечник и полувозбужденные сердечники здесь заштрихованы. Остальные сердечники в рассматриваемые моменты цикла обращения не испытывают воздействия магнитного поля.

Из рис. 6-8, *а* видно, что в квадратной матрице, которая содержит p^2 сердечников, при считывании информации, кроме

избранного сердечника, возбуждаемого полем с напряженностью $-H_m$, возбуждение полем с напряженностью $-H_m/2$ испытывают $2(p-1)$ сердечников. При этом изменение магнитной индукции в полувозбужденных сердечниках, а значит, и индуктируемая ими в обмотке считывания э. д. с. помех зависят от их магнитных характеристик, от записанного в них кода и от магнитной предыстории каждого конкретного сердечника.

Дело в том, что в течение цикла обращения к ЗУ происходит полувозбуждение ряда сердечников не только при считывании, но и при записи информации. Так, при записи «1» (рис. 6-8, *б*) все сердечники, пронизанные возбуждающими шинами, кроме избранного, испытывают воздействие поля с напряженностью

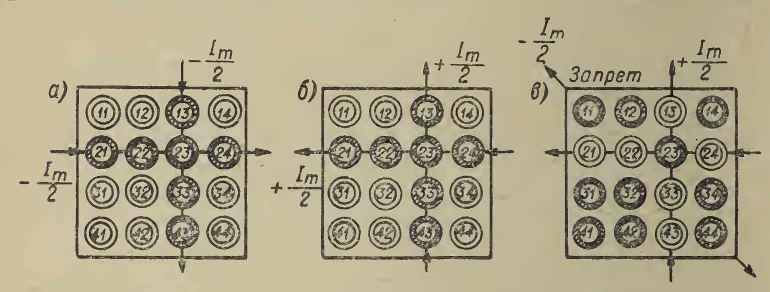


Рис. 6-8. Распределение возбуждений сердечников при считывании и записи информации в разрядной матрице 4×4: *а* — считывание с сердечника 23; *б* — запись единицы в сердечнике 23; *в* — запись нуля в сердечнике 23.

$+H_m/2$, а на избранный сердечник действует поле $+H_m$. При записи «0» (рис. 6-8, *в*) все сердечники, не пронизанные возбуждающими шинами, испытывают воздействие поля с напряженностью $-H_m/2$, создаваемого обмоткой запрета записи, а на избранный сердечник действует поле $+H_m/2$.

Влияние этих многократных и случайно распределенных процессов возбуждения полем половинной амплитуды приводит к частичному разрушению записанной в сердечниках информации, т. е. к изменению абсолютной величины положительной (хранение «1») или отрицательной (хранение «0») остаточной индукции сердечника. Из этого можно сделать заключение, что и величины помех, индуктируемых полувозбужденными сердечниками при считывании, оказываются различными.

Если бы обмотка считывания пронизывала все сердечники матрицы в одном направлении, то, поскольку знак изменения индукции во всех сердечниках одинаков, э. д. с., индуктируемая в этой обмотке при считывании, была бы равна сумме э. д. с., индуктированных всеми возбуждаемыми сердечниками:

$$E=E_c+\sum_{i=1}^{p-1} e_{ix}+\sum_{j=1}^{p-1} e_{jy}, \qquad (6\text{-}14)$$

где $E_с$ — э. д. с. считывания с избранного сердечника; при считывании единицы $E_с = E_1$ (сигнал), а при считывании нуля $E_с < E_1$ (помеха); e_{ix} — э. д. с. помехи, индуктируемой i-м сердечником в возбужденной строке x; e_{jy} — э. д. с. помехи, индуктируемой j-м сердечником в возбужденном столбце y.

Если предположить, что все сердечники идентичны и что, независимо от записанного в них кода, каждый из них создает в обмотке считывания одинаковую э. д. с. помехи e, то выражение (6-14) примет вид:

$$E = E_с + 2(p - 1)e. \tag{6-15}$$

При большом количестве сердечников в матрице, когда p велико, второй член выражения (6-15), представляющий собой суммарную помеху, может значительно превысить величину полезного сигнала $E_с$ считывания «1», что сделает выделение сигнала из помех практически невозможным.

Для устранения этого явления сердечники в матрице можно прошить проводом считывания в диагональных направлениях, как показано на рис. 6-2. При этом каждая пара сердечников, расположенных рядом в любой строке или в любом столбце матрицы, оказывается прошитой проводом считывания в противоположных направлениях.

При таком методе прошивки происходит частичная взаимная компенсация помех, создаваемых $(p - 2)$ парами сердечников, т. е. компенсируются помехи всех полувозбужденных сердечников, кроме двух. Тогда усредненное значение результирующей э. д. с., индуктируемой в обмотке при считывании «1» с любого сердечника матрицы, определяется выражением:

$$E = E_1 + 2e + \sum_{k=1}^{p-2} (e_{2k} - e_{2k-1}), \tag{6-16}$$

где E_1 и e — усредненные по элементам матрицы значения сигнала считывания «1» и помехи, создаваемой полувозбужденным сердечником.

Последний член выражения — сумма разностей э. д. с. помех, создаваемых сердечниками взаимно компенсирующихся пар при условии полной идентичности параметров и состояний сердечников, в идеальном случае может быть равен нулю.

Наряду с помехами, обусловленными влиянием полувозбужденных сердечников, в обмотке считывания наводятся также помехи вследствие непосредственного электромагнитного влияния селектирующих шин. Эти наводки также могут быть скомпенсированы при определенной конфигурации обмотки считывания [1-9, 1-11].

Однако, наряду с компенсируемыми помехами, при считывании информации в ЗУ всегда возникают некомпенсируемые помехи, обусловленные неидентичностью параметров сердечников и неодинаковостью их остаточных состояний. Дело в том, что при

возбуждении полутоком считывания изменение индукции ΔB_1 в сердечнике, в котором записана «1», всегда больше изменения индукции ΔB_0 в сердечнике, в котором записан «0». Обусловленная этим обстоятельством разность помех $\Delta e_1 - \Delta e_0$ очень мала, но в наиболее неблагоприятном случае она умножается на коэффициент порядка p и может достигать величины, соизмеримой с полезным сигналом или даже превышающей его.

Предложен ряд различных способов снижения влияния некомпенсируемых помех [1-11].

Принципиально наиболее радикальной мерой снижения помех является устранение основной причины, заключающейся в недостаточной прямоугольности петли гистерезиса. При этом особенно важно увеличение динамического коэффициента прямоугольности R.

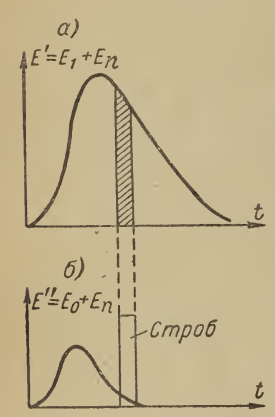
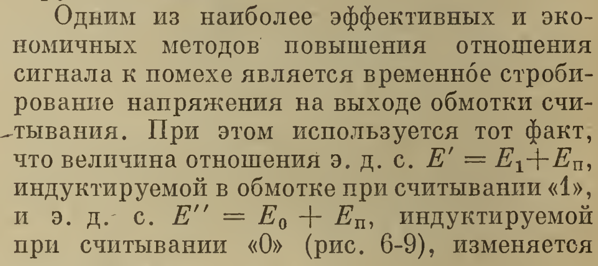
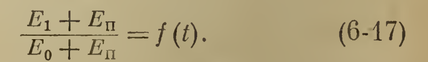


Рис. 6-9. Стробирование при считывании сигналов, обеспечивающее максимальное отношение сигнала к помехе: *а* — э. д. с., индуктированная при считывании кода «1»; *б* — э. д. с., индуктированная при считывании кода «0».

Однако такая мера требует разработки новых составов ферритов и изменения технологии производства ферритовых сердечников, причем практически существует некоторая предельная граница улучшения прямоугольности петли. Поэтому разность $\Delta e_1 - \Delta e_0$ не удается снизить до нуля, и, следовательно, при очень большом количестве сердечников в матрице данный способ не решает проблемы уничтожения некомпенсируемых помех.



Одним из наиболее эффективных и экономичных методов повышения отношения сигнала к помехе является временно́е стробирование напряжения на выходе обмотки считывания. При этом используется тот факт, что величина отношения э. д. с. $E' = E_1 + E_п$, индуктируемой в обмотке при считывании «1», и э. д. с. $E'' = E_0 + E_п$, индуктируемой при считывании «0» (рис. 6-9), изменяется во времени:



$$\frac{E_1 + E_п}{E_0 + E_п} = f(t). \qquad (6\text{-}17)$$

Объясняется это тем, что импульс э. д. с. помех, обусловленный в основном обратимыми процессами или и необратимыми процессами, но связанными с весьма незначительными изменениями магнитного потока сердечников, заканчивается гораздо раньше полезного сигнала, который связан с полным перемагничиванием считываемого сердечника.

Таким образом, стробируя считанное напряжение импульсом, соответствующим по времени второй части импульса «1», можно в значительной мере исключить влияние некомпенсируемой помехи, даже если она и превосходит по амплитуде полезный сигнал.

Улучшения условий стробирования можно добиться, если использовать для получения стробирующих импульсов не независимый от матрицы ЗУ источник, а источник, управляемый сердечником, который перемагничивается при совпадении токов по осям X и Y матрицы. Такой метод получения стробирующих импульсов рассмотрен в работе [6-9].

6-3. Двухмерные запоминающие устройства

Элементарные сведения о принципе работы двухмерных ЗУ были приведены в § 6-1 (рис. 6-3). Главное отличие их от трехмерных ЗУ состоит в том, что при считывании информации осуществляется возбуждение только тех n запоминающих сердечников, которые относятся к одной, n-разрядной, числовой ячейке (регистру), определяемой заданным адресом и прошитой одной адресной шиной Z. Этой основной характеристикой определяются и различные варианты названий двухмерных ЗУ. Их также называют ЗУ с прямым выбором, с непосредственной выборкой, с линейным выбором, с числовой организацией, со словарной организацией, типа Z, ячеечного типа.

Так как выбор заданной числовой ячейки, или, что то же самое, пронизывающей ее сердечники шины Z, здесь должен производиться, в отличие от трехмерного ЗУ, вне запоминающих элементов, то двухмерные ЗУ можно еще назвать *устройствами с внешней селекцией*.

Внешняя селекция в большинстве ЗУ осуществляется в специальных матричных схемах, построенных на так называемых *магнитных ключах* или *координатных трансформаторах*.

Такие матричные схемы называют часто сетками координатных трансформаторов или просто *координатными сетками*. Находят применение также диодные и диодно-трансформаторные координатные сетки.

Координатная сетка служит для внешнего по отношению к запоминающей части выбора числовой шины Z. Этот выбор осуществляется обычно по принципу совпадения токов или напряжений во взаимно перпендикулярных шинах, селекция которых, в свою очередь, выполняется дешифраторными схемами.

По принципу системы размещения запоминающих сердечников двухмерные ЗУ строятся в двух вариантах.

В одном из вариантов, наглядная схема которого приведена на рис. 6-10, запоминающие сердечники каждого разряда всех чисел образуют отдельную разрядную плату, подобно разрядной плате (матрице) трехмерного ЗУ токов. Таким образом, блок ЗУ емкостью m n-разрядных чисел, представляет собой объемную конструкцию, состоящую из n разрядных плат, в каждой из которых содержится m запоминающих сердечников.

Другой, плоский, вариант блока показан на схеме рис. 6-11. В этом варианте все запоминающие сердечники блока емкостью m n-разрядных чисел размещены в одной плоской матрице, прошитой m адресными шинами Z, каждая из которых пронизывает n сердечников. Координатная сетка, изображенная на рис. 6-11 в виде отдельной платы, перпендикулярной запоминающей матрице, часто монтируется в плоскости последней, образуя с ней общую плату, или, как ее часто называют, к а с с е т у, представляющую собой законченный блок памяти емкостью m n-разрядных чисел.

Подобный вариант монтажа двухмерных ЗУ применяется в большинстве отечественных разработок. Например, в машине БЭСМ-2 [1-18] применены магнитные кассеты, представляющие

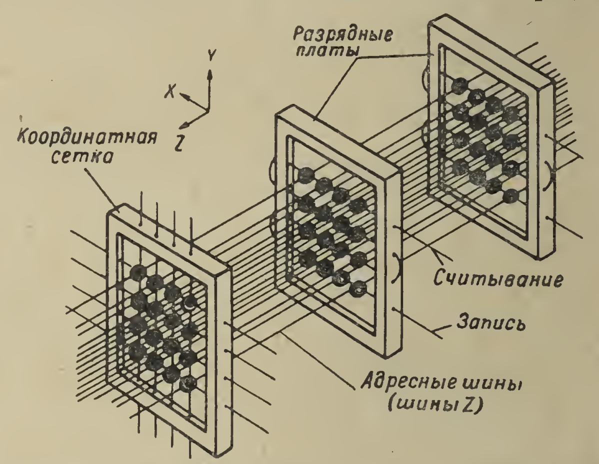


Рис. 6-10. Наглядная схема объемного блока двухмерного ЗУ.

собой отдельные блоки ЗУ емкостью в 128 48-разрядных чисел. Каждая кассета состоит из двух частей. В одной — координатной части — размещены координатные трансформаторы, в другой — запоминающей части — запоминающие сердечники. Магнитные кассеты объединены по восемь штук в блоки емкостью в 1024 48-разрядных чисел.

Полная емкость куба запоминающего устройства БЭСМ-2, составляющая 2047 или 4095 чисел, обеспечивается соответственно использованием двух или четырех таких блоков.

В схемах обоих вариантов, приведенных на рис. 6-10 и 6-11, на каждый разряд показано по одной общей обмотке, выполняющей роль разрядной обмотки считывания и записи. На практике часто предусматривают отдельные разрядные обмотки записи и считывания, что, хотя и усложняет монтаж, но делает управление ЗУ более простым и надежным.

Рассмотрим процессы, которые происходят в течение цикла обращения к ЗУ. Цикл обращения к какой-либо ячейке начинается

со считывания информации в ней. Для этого в соответствующую шину Z подается импульс тока, амплитуда и полярность которого выбраны так, чтобы все сердечники, пронизанные возбужденной (избранной) шиной Z, перемагничивались в состояние «0». Предположим, что для этого нужно подать в шину отрицательный импульс, амплитуда которого принципиально ничем не ограничена. Практически же она ограничивается свойствами адресных элементов координатной сетки и помехами, возникающими в соседних адресных элементах при возбуждении избранного элемента большими токами. Однако возможность считывания информации большими импульсами магнитного поля, порядка нескольких H_m, обеспечивает значительное ускорение процесса считывания и получение полезных сигналов с большой амплитудой.

Так как при считывании все остальные сердечники, кроме избранного, прошитые разрядной обмоткой считывания, в принципе не испытывают частичного возбуждения, то они и не создают на выходе никаких помех. Таким образом, обеспечивается высокая помехоустойчивость двухмерного ЗУ.

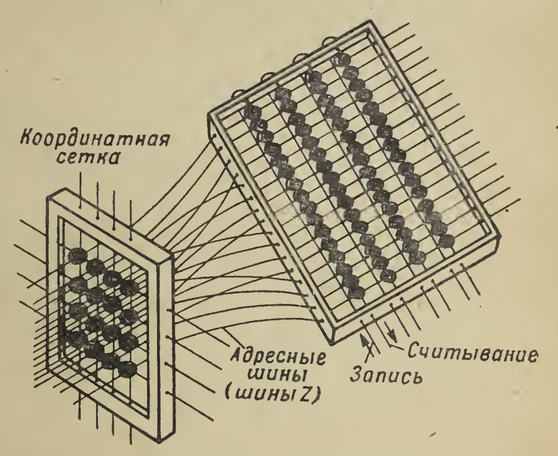


Рис. 6-11. Наглядная схема плоского блока двухмерного ЗУ.

Следующая часть цикла предназначается для записи новой или регенерации только что считанной информации. Запись можно производить по обычному принципу совпадения полутоков. Для этого нужно в соответствующую числовую шину Z подать положительный импульс тока с амплитудой $I_m/2$, а также подать положительные импульсы с амплитудой $I_m/2$ в разрядные обмотки записи тех разрядов, где должна быть записана «1». Обмотки записи тех разрядов, где должен быть записан «0», при этом не возбуждаются.

Однако при таком способе записи необходимо соблюдать столь же жесткие требования к амплитуде импульсов тока, как и в ЗУ с совпадением полутоков. Кроме того, импульсы полутоков в разрядных шинах записи оказывают разрушающее действие на сердечники других, неизбранных ячеек.

Поэтому значительно бо́льшее распространение получил способ записи импульсами разной полярности. При этом в числовую шину подается импульс $+2I_m/3$, а в разрядную $+I_m/3$ при записи «1» или $-I_m/3$ при записи «0». В сердечниках избранной

числовой ячейки будет создаваться либо напряженность поля $+H_m$, достаточная для перемагничивания сердечника в состояние «1», либо напряженность $+H_m/3$, под влиянием которой нулевое состояние сердечника не изменится. Разрушающее действие разрядного тока с амплитудой $I_m/3$ на сердечники неизбранных числовых ячеек также значительно меньше, чем разрушающее действие полутоков $I_m/2$.

Рассмотрим вопрос о соотношении амплитуд импульсов при записи информации и о допусках на отклонения этих амплитуд от нормы.

Обозначим через I_m минимальный ток, при котором происходит полное перемагничивание сердечника, и через $I_п$ — максимальное (пороговое) значение, при котором переключение сердечника еще не происходит. Следовательно, при считывании ток I_Z в числовой шине должен быть не менее I_m.

При записи «1» суммарная величина минимальных значений тока I_Z в числовой шине и разрядного тока записи $I_з$ должна обеспечить перемагничивание сердечника, т. е. должно соблюдаться условие:

$$I_{z\ мин}+I_{з.\ мин}\geqslant I_m. \qquad (6\text{-}18)$$

При записи «0» разность максимального значения тока в числовой шине и минимального разрядного тока должна быть такой, чтобы не произошло перемагничивание сердечника, т. е. должно удовлетворяться условие:

$$I_{z\ макс}-I_{з.\ мин}\leqslant I_п. \qquad (6\text{-}19)$$

Для того, чтобы под влиянием разрядного тока записи не происходило разрушение информации в сердечниках неизбранных числовых ячеек, необходимо выполнение условия:

$$I_{з.\ макс}\leqslant I_п. \qquad (6\text{-}20)$$

Обозначим через δ и ε допустимые относительные отклонения токов I_Z и $I_з$ от номинальных значений:

$$\delta=\frac{I_{z\ макс}-I_z}{I_z}=\frac{I_z-I_{z\ мин}}{I_z} \qquad (6\text{-}21)$$

и

$$\varepsilon=\frac{I_{з.\ макс}-I_з}{I_з}=\frac{I_з-I_{з.\ мин}}{I_з}. \qquad (6\text{-}22)$$

Тогда, исходя из выражений (6-18), (6-19) и (6-20), для случая максимальных допусков можно написать следующие уравнения:

$$(1-\delta)I_z+(1-\varepsilon)I_з=I_m; \qquad (6\text{-}23)$$

$$(1+\delta)I_z-(1-\varepsilon)I_з=I_п; \qquad (6\text{-}24)$$

$$(1+\varepsilon)I_з=I_п. \qquad (6\text{-}25)$$

Введем обозначение:

$$\alpha=\frac{I_m}{I_п}. \qquad (6\text{-}26)$$

Если сложить уравнения (6-23) и (6-24) и подставить в них обозначение (6-26), то получим выражение:

$$\frac{I_z}{I_m}=\frac{1+\alpha}{2\alpha}. \tag{6-27}$$

Далее, если подставить значение $I_п$ из (6-25) в уравнение (6-24), то получим соотношение:

$$\frac{I_з}{I_z}=\frac{1+\delta}{2}. \tag{6-28}$$

Наконец, подставляя в (6-27) значение I_Z из (6-24) и заменяя $I_з$ и I_m через $I_п$ согласно (6-25) и (6-26), после преобразований получим

$$(1+\delta)(1+\varepsilon)=\frac{4}{1+\alpha}. \tag{6-29}$$

Уравнением (6-29) определяется взаимная зависимость допусков δ и ε на токи I_Z и $I_з$ при различных значениях параметра α, характеризующего примененные в ЗУ сердечники. Практически величина α заключена в пределах от 1,5 до 2,0. Для большинства типов сердечников α равна около 1,6.

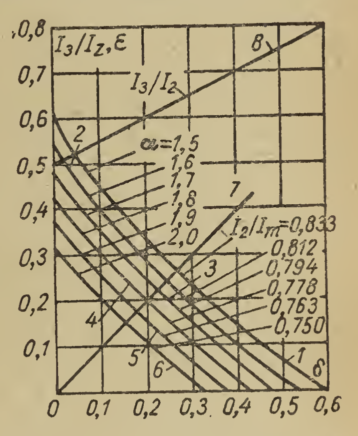


Рис. 6-12. Соотношения токов и допусков на токи управления в двухмерных ЗУ.

На рис. 6-12 изображено семейство кривых, построенных по уравнению (6-29) для различных значений α (кривые $1 \div 6$). По этим кривым можно определить допуск на один из токов (I_Z или $I_з$), если задаться допуском на другой ток. На кривых $1 \div 6$, кроме значений α, написаны однозначно соответствующие им значения отношения I_Z/I_m, определенные по уравнению (6-27).

В той же системе координат вычерчены еще два графика. График 7 представляет собой линию равных допусков δ и ε, а график 8 изображает функцию $I_з/I_Z = f(\delta)$ и построен по уравнению (6-28).

Сравним допуски, определяемые из графиков рис. 6-12, с аналогичными данными, определяемыми для трехмерного ЗУ из графиков рис. 6-7. Так, для $\alpha = 1,6$ при условии, что допуски δ и ε одинаковы, получим их значения $\delta = \varepsilon = 24\%$ по сравнению с 7,5%, полученными при тех же условиях для трехмерных ЗУ. Этими цифрами наглядно подтверждается значительно ме́ньшая критичность к колебаниям амплитуды импульсов возбуждения двухмерных ЗУ по сравнению с трехмерными.

Однако для повышения надежности ЗУ следует добиваться сведения к минимуму колебаний амплитуды токов возбуждения

и максимальной стабилизации режима работы ЗУ. Между тем одной из существенных причин нестабильности режима двухмерного ЗУ может явиться нестабильность нагрузки на селектирующие элементы координатной сетки (магнитные ключи или координатные трансформаторы).

Выходная обмотка координатного трансформатора *КТ* нагружена числовой шиной Z, пронизывающей n запоминающих разрядных сердечников выбранного числа (рис. 6-13). Сопротивление этой нагрузки зависит от кода, записанного в данной числовой ячейке. Наибольшей величины нагрузка достигает в случае, когда во всех сердечниках записана «1» и, следовательно, при считывании происходит перемагничивание всех сердечников. Когда же записанное число состоит из одних нулей, то при считывании не перемагничивается ни один сердечник, и нагрузка будет минимальной. Если сердечники изготовлены из материала с хорошей прямоугольностью петли гистерезиса, то сопротивление цепи может изменяться в десятки раз.

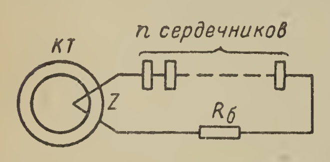


Рис. 6-13. Стабилизация тока в числовой шине балластным сопротивлением.

Это явление, естественно, весьма нежелательно, так как оно вызывает значительные колебания величины тока в шине Z и создаваемой этим током напряженности магнитного поля, а значит, в конечном счете, изменение времени перемагничивания сердечников и величины сигнала считывания. Все это может сказаться на устойчивости и надежности работы ЗУ.

Для уменьшения зависимости величины тока в шине Z числовой линейки от записанного в ней кода необходимо питать ее от источника импульсов, работающего в качестве источника тока, т. е. добиваться, чтобы выходное сопротивление источника импульсов было значительно больше максимального сопротивления полезной нагрузки.

Для этого можно, как показано на рис. 6-13, последовательно включить в шину числовой линейки достаточно большое балластное сопротивление $R_б$. Однако при этом резко возрастают потери и снижается к. п. д. всего устройства.

Поэтому в отечественных ЗУ с непосредственной выборкой, как правило, используется другой, более эффективный способ стабилизации сопротивления нагрузки с помощью компенсационных сердечников. При этом способе для запоминания каждого разряда используются два сердечника — запоминающий и компенсационный. При записи информации оба сердечника намагничиваются, а шина Z пронизывает эти сердечники, как показано на рис. 6-14, в противоположных направлениях. Поэтому, когда при считывании информации под влиянием импульса тока считывания I_Z перемагничиваются n_1 запоминающих сердечников, где n_1 — количество единиц в коде считываемого числа, то одновре-

менно перемагничиваются и $(n - n_1)$ компенсационных сердечников, где $(n - n_1)$ — количество нулей в коде считываемого числа.

Таким образом, общее количество перемагничиваемых сердечников в любой числовой линейке ЗУ оказывается всегда постоянным и равным сумме перемагничиваемых запоминающих и компенсирующих сердечников, что составляет n сердечников, т. е. количество разрядов числового регистра. Этим достигается стабилизация нагрузки выходной обмотки координатного ключа независимо от кода, записанного в выбранной числовой ячейке.

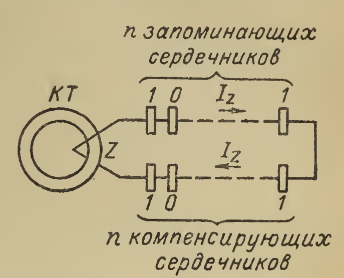


Рис. 6-14. Числовая линейка с компенсирующими сердечниками.

Однако преимущества применения двух сердечников на разряд не ограничиваются стабилизацией нагрузки. При этом появляется также возможность получения при считывании двухполярных сигналов, что значительно повышает распознаваемость считанных сигналов и помехоустойчивость ЗУ.

Рассмотрим процессы записи и считывания информации в одном запоминающем элементе на двух сердечниках. Схема прошивки такого элемента представлена на рис. 6-15, *а*. Запоминающий сердечник *1* и компенсационный сердечник *2* прошиты тремя шинами: числовая шина Z проходит через них в противоположных направлениях, а шины записи и считывания — в одинаковых направлениях.

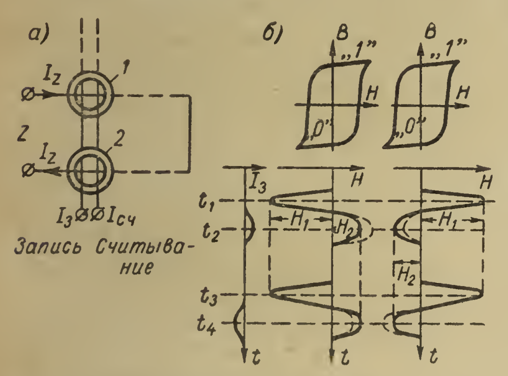


Рис. 6-15. Запоминающий элемент с компенсационным сердечником: *а* — схема прошивки; *б* — временны́е диаграммы процессов записи и считывания информации.

Временны́е диаграммы процессов записи и считывания информации представлены на рис. 6-15, *б*. Выбранный координатный трансформатор KT выдает в числовую шину Z двухполярный импульс тока.

Первая полуволна тока (моменты t_1 и t_3) имеет амплитуду, достаточную для создания напряженности поля $H_1 \geqslant H_m$, обеспечивающей полное перемагничивание сердечников. Эта полуволна используется для считывания информации и может иметь амплитуду, в несколько раз превосходящую значение напряженности H_m.

Благодаря тому, что сердечники *1* и *2* прошиты шиной Z в противоположных направлениях, в результате считывания информации

запоминающий сердечник всегда оказывается в состоянии отрицательной намагниченности, а компенсационный сердечник — в состоянии положительной намагниченности. Следовательно, если в обоих сердечниках была записана «1», то происходит перемагничивание только одного запоминающего сердечника из положительного в отрицательное состояние. Если же в обоих сердечниках был записан «0», то перемагничивается только компенсирующий сердечник из отрицательного состояния в положительное. Поскольку оба сердечника прошиты проводником считывания в одном направлении, то импульсы считывания, индуктированные в этом проводнике, будут иметь различную полярность при считывании «1» и «0». Это различие сигналов считывания не по количественному (амплитуда), а по качественному (полярность) признаку является существенным достоинством описываемой схемы запоминающего элемента, позволяющим упростить цепи считывания и повысить надежность ЗУ.

Запись новой информации или регенерация только что считанной информации производится в моменты t_2 или t_4, когда действует вторая полуволна тока I_Z. Она создает напряженность поля H_2, недостаточную для перемагничивания сердечника, но бо́льшую $H_m/2$, так что удовлетворяется неравенство $H_m/2 < H_2 < H_m$. При этом вследствие того, что сердечники *1* и *2* прошиты одной шиной Z в противоположных направлениях, в моменты времени t_2 и t_4 на запоминающий сердечник воздействует напряженность поля $+H_2$, а на компенсационный сердечник — напряженность $-H_2$.

При записи информации в моменты, совпадающие со второй полуволной тока I_Z, в разрядный провод записи подаются импульсы тока с амплитудой $I_3 < I_m/2$, которые создают в обоих сердечниках напряженность $H_3 < H_m/2$, положительную при записи «1» и отрицательную при записи «0».

Таким образом, при записи «1» в момент t_2 на запоминающий сердечник воздействует положительная напряженность поля $H_2 + H_3$. Амплитуды тока второй полуволны I_Z и разрядного тока записи I_3 выбираются так, чтобы удовлетворялось приблизительное равенство $H_2 + H_3 \approx H_m$, что обеспечивает намагничивание запоминающего сердечника до насыщения в положительном направлении. Можно, например, выбрать $H_2 = 3H_m/4$ и $H_3 = H_m/4$ или $H_2 = 2H_m/3$ и $H_3 = H_m/3$. Тогда $H_2 + H_3 = H_m$.

В тот же момент t_2 на компенсационный сердечник будет действовать отрицательная напряженность поля, абсолютная величина которой равна $H_2 - H_3 \leqslant H_m/2$. Эта напряженность недостаточна для перемагничивания компенсационного сердечника, и, следовательно, он сохранит положительную намагниченность, оставшуюся после считывания. Таким образом, оба сердечника после окончания цикла обращения будут намагничены в положительном направлении, т. е. в них будет записана «1».

При записи «0» в момент t_4 запоминающий сердечник подвергается воздействию положительной напряженности поля

$H_2 - H_3 \leqslant H_m/2$, недостаточной для перемагничивания его. Поэтому запоминающий сердечник остается в состоянии отрицательной намагниченности.

На компенсационный сердечник в момент t_4 воздействует отрицательная напряженность, абсолютная величина которой равна $H_2 + H_3 = H_m$. Поэтому компенсационный сердечник перемагничивается в отрицательное состояние, и после окончания цикла оба сердечника оказываются в состоянии отрицательной намагниченности, т. е. в обоих будет записан «0».

Благодаря тому, что токи в проводе записи I_3 имеют величину, ме́ньшую чем $I_m/2$ (обычно порядка $I_m/3 \div I_m/5$), они почти не нарушают магнитные состояния сердечников других, неизбранных числовых ячеек.

Как указывалось выше, в двухмерных ЗУ должен осуществляться внешний по отношению к запоминающей части выбор числовых шин Z. Этот выбор в действующих в настоящее время ЗУ чаще всего реализуется в магнитных дешифраторах — координатных сетках, построенных на *магнитных ключах* (координатных трансформаторах).

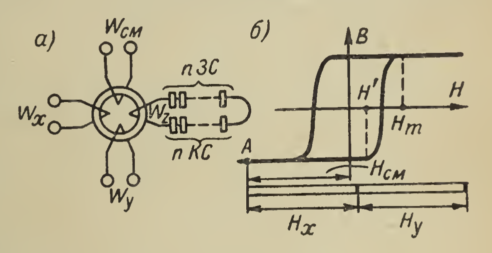


Рис. 6-16. Магнитный ключ (*а*) и соотношение напряженностей поля, создаваемых его обмотками (*б*).

Магнитный ключ (рис. 6-16, *а*) представляет собой импульсный трансформатор с четырьмя обмотками, намотанными на тороидальном ферритовом сердечнике с ППГ. Селектирующие обмотки w_x и w_y предназначаются для возбуждения трансформатора, который перемагничивается при совпадении токов в обеих обмотках. По обмотке $W_{см}$ пропускается некоторый постоянный ток смещения, под действием которого сердечник находится в состоянии глубокого отрицательного насыщения, характеризуемого рабочей точкой A на петле гистерезиса (рис. 6-16, *б*). Обмотка W_Z является выходной обмоткой трансформатора, нагруженной числовой шиной Z соответствующей ячейки. Каждая шина Z пронизывает n запоминающих сердечников *ЗС* и, в случае применения описанного ранее метода стабилизации нагрузки, — n компенсирующих сердечников *КС* n-разрядной числовой ячейки.

Соотношения токов возбуждения и смещения таковы, что при прохождении тока только по одной из обмоток возбуждения W_x или W_y сердечник не перемагничивается. При одновременном же пропускании токов по обеим обмоткам возбуждения создается суммарная положительная напряженность поля $|H_x| + |H_y| \geqslant$ $\geqslant |H_{см}| + |H_m|$, обеспечивающая переключение сердечника в состояние положительной намагниченности. При этом в обмотке W_Z индуктируется импульс считывания, воздействующий

на все сердечники соответствующей числовой ячейки. После прекращения импульсов тока в обмотках W_x и W_y сердечник под действием поля, создаваемого обмоткой смещения, снова возвращается в состояние отрицательной намагниченности.

Вследствие того, что сердечники координатных трансформаторов не предназначаются для хранения информации, а выполняют лишь переключающие функции, являясь схемами совпадения или вентилями, величины токов смещения $I_{\text{см}}$ и токов возбуждения селектирующих шин I_x и I_y могут быть принципиально выбраны сколь угодно большими при условии соблюдения неравенства:

$$|H_x| = |H_y| < |H_{\text{см}}| + |H'|, \tag{6-30}$$

где H' — такая напряженность поля, при превышении которой начинает заметно изменяться магнитное состояние сердечника.

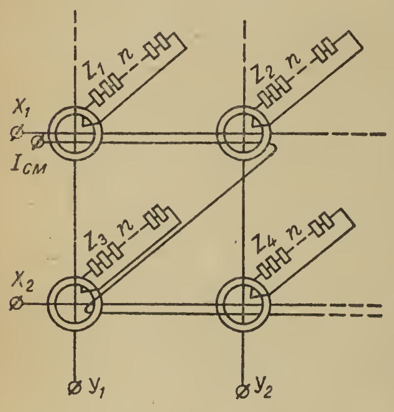


Рис. 6-17. Координатная сетка из четырех магнитных ключей.

Допустимость применения больших амплитуд токов $I_{\text{см}}$, I_x и I_y обеспечивает возможность форсированного перемагничивания магнитных ключей, что, в свою очередь, позволяет уменьшить время обращения к ЗУ.

На рис. 6-17 изображена координатная сетка из четырех магнитных ключей, представляющая собой матричную схему, работающую по принципу совпадения двух токов в шинах X и Y, которая служит для выбора заданной числовой ячейки. В узлах матрицы размещены магнитные ключи, выходные обмотки которых нагружены шинами Z, пронизывающими сердечники избранной числовой ячейки.

Магнитные ключи (координатные трансформаторы) должны, очевидно, обеспечивать выдачу импульсов, достаточных по мощности для надежного перемагничивания n сердечников числовой линейки. Это влечет за собой необходимость применения в координатных трансформаторах сердечников значительно бо́льших размеров, чем запоминающие и компенсационные сердечники.

Далее, из соображений надежности работы ЗУ важно, чтобы токи помехи, выдаваемые полуизбранными координатными трансформаторами в числовые линейки, не превышали по амплитуде величины $I_{\text{п}}$, т. е. некоторого порогового значения, при котором не происходит перемагничивания сердечника. Для облегчения выполнения этого требования очень важно использовать для координатных трансформаторов материал с максимально прямоугольной петлей гистерезиса.

Методика расчета системы «координатный трансформатор — числовая линейка» приведена в [1-18 и 5-3]. Наряду с описанной схемой магнитного дешифратора, получившей широкое применение в двухмерных ЗУ отечественных ЦВМ, разработан ряд других схем селекции числовой линейки [1-11, 1-16].

Значительного повышения быстродействия схем дешифрации адреса удается добиться, применяя в них диодно-трансформаторные и чисто диодные сетки. Эти вопросы более подробно будут освещены в гл. 15.

6-4. $2^1/_2$-мерные запоминающие устройства

Поиски способов организации накопителя, позволяющих возможно лучше сочетать противоречивые требования большой емкости, уменьшения количества периферийного оборудования (схем управления) и высокого быстродействия, привели к разработке в 1965 г. ЗУ, в котором разрядные обмотки служат не только для записи информации, как в двухмерных и трехмерных ЗУ, но и для селекции запоминающих элементов как при записи, так и при считывании информации. В связи с тем, что это ЗУ по своим схемным принципам и характеристикам занимает как бы промежуточное положение, оно получило условное название $2^1/_2$-мерного ЗУ (ЗУ типа $2^1/_2$ Д).

Способ построения и работу $2^1/_2$-мерной схемы в режимах считывания и записи рассмотрим на примере ЗУ емкостью 32 3-разрядных слов. Для построения этого ЗУ по двухмерной схеме потребовалось бы 32 числовые управляющие шины и три разрядные шины. При этом каждая числовая шина прошивала бы по 3 сердечника, а каждая разрядная — по 32. Это неблагоприятное соотношение числа шин и сердечников на них улучшено в $2^1/_2$-мерном ЗУ за счет уменьшения количества числовых шин в некоторое число раз k и соответственного увеличения количества разрядных шин в это же число раз. Коэффициент k выбирается на основании следующих соображений.

Общее количество сердечников, прошитых одной числовой шиной, должно примерно равняться общему количеству сердечников, прошитых одной разрядной шиной:

$$\frac{m}{k} \approx nk, \tag{6-31}$$

где m — количество чисел в ЗУ; n — количество разрядов в числе. Отсюда

$$k \approx \sqrt{\frac{m}{n}}. \tag{6-32}$$

Для удобства дешифрации необходимо, чтобы

$$k = 2^p, \tag{6-33}$$

где p — целое число.

Для рассматриваемого примера

$$k \approx \sqrt{\frac{32}{3}} \approx 3{,}3.$$

На основании второго условия необходимо выбрать $k = 4$.

Тогда количество числовых шин $m_1 = 32 : 4 = 8$ и каждая числовая шина прошивает 12 сердечников, а число разрядных шин $n_1 = 3 \cdot 4 = 12$ и каждая разрядная шина прошивает 8 сердеч-

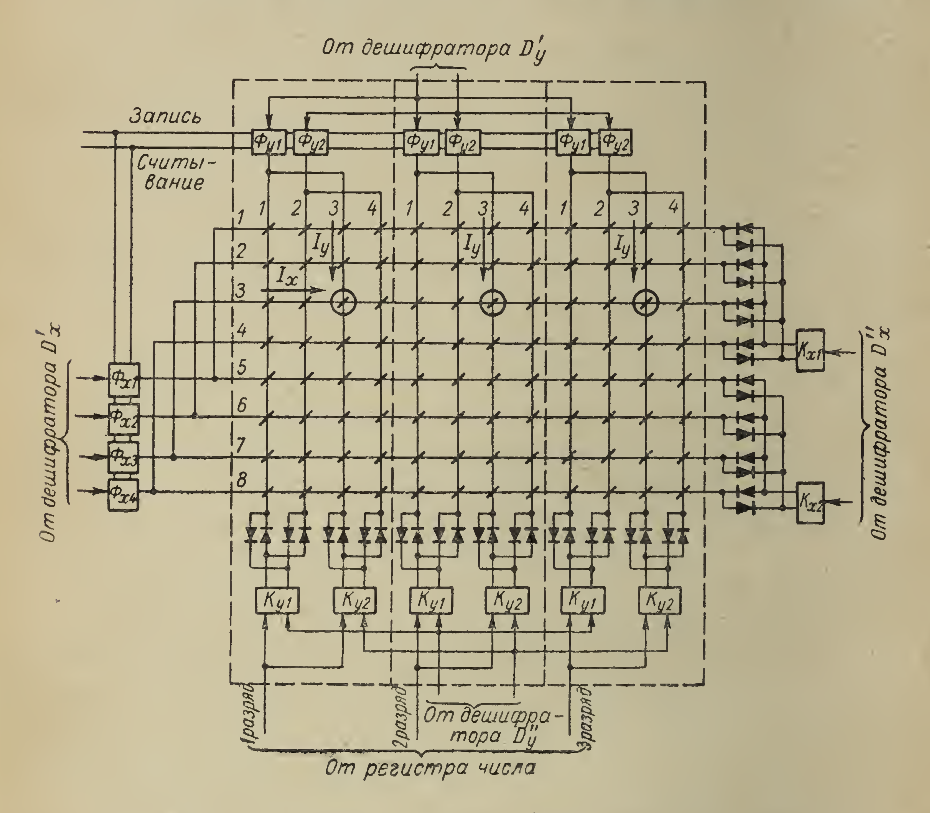


Рис. 6-18. Схема построения $2^1/_2$-мерного ЗУ емкостью 32 3-разрядных числа.

ников. Схема построения $2^1/_2$-мерного ЗУ емкостью 32 3-разрядных чисел показана на рис. 6-18. Здесь запоминающие сердечники расположены в виде прямоугольной матрицы 8×12. Числовые шины расположены горизонтально, а разрядные — вертикально. Такое перестроение матрицы запоминающих сердечников (в двухмерном ЗУ матрица имеет вид 32×3) выравнивает число сердечников, прошитых каждой числовой и каждой разрядной шиной, а также уменьшает общее количество управляющих шин.

Точное равенство числа сердечников на каждой шине может быть получено в том случае, когда

$$\frac{m}{n} = 2^{2p}. \tag{6-34}$$

На рис. 6-18 группы сердечников одноименных разрядов запоминающих ячеек обведены пунктирными линиями. Так как числовые шины прошивают в каждом разряде по 4 сердечника (в общем случае по k сердечников), то выбор одного слова не может быть осуществлен путем возбуждения одной числовой шины полным током перемагничивания сердечников, как это делается в двухмерном ЗУ. В данной схеме выбор числа осуществляется по методу совпадения токов, для чего возбуждаются полутоками одна числовая шина и по одной разрядной шине в каждом разряде. Для того чтобы возбудить одну разрядную шину в каждом разряде имеются формирователи тока (Φ_y), переключатели напряжения (ключи K_y) и дешифраторная диодная матрица. Выбор соответствующих формирователей и ключей (одноименных в каждом разряде) осуществляется дешифраторами первой ступени (D'_y и D''_y), которые расшифровывают часть кода адреса. Подобная схема служит и для возбуждения одной числовой шины.

Дешифраторы оконечной ступени могут быть построены по любой схеме. В данном случае использованы диодные матрицы как наиболее быстродействующие и экономичные.

Рассмотрим как осуществляется запись и считывание информации из одной запоминающей ячейки, сердечники которой на рис. 6-18 обведены кружками.

При чтении этого слова посылаются импульсы тока I_x и I_y по третьей числовой шине и по третьим разрядным шинам всех разрядов, для чего открываются соответственно ключи K_{x1} и K_{y2} и возбуждаются формирователи Φ_{x3} и Φ_{y1}. Направления импульсов тока I_x и I_y обозначены на рис. 6-18 стрелками.

Если сердечник находился в состоянии «0», то он не изменит своего состояния, а сердечник, в котором хранилась «1», под действием селектирующих импульсов перемагнитится в противоположное состояние и в обмотке считывания, которая прошивает все сердечники одного разряда (на рисунке не показана), наведется э. д. с. считывания.

При записи (регенерации) числа в данную ячейку посылаются импульсы тока I_x и I_y по тем же шинам, но в противоположном направлении. Для этого все формирователи и ключи должны быть биполярными. Разрядный полуток I_y посылается в выбранные шины только тех разрядов, в которые необходимо записать «1». При записи «0» разрядный ток не посылается, для чего закрываются ключи K_y в соответствующих разрядах.

Рассмотрим вопрос о соотношении амплитуд управляющих токов и о допусках на отклонения этих амплитуд от нормы подобно

тому, как это было сделано для трехмерных ЗУ в § 6-2 и для двухмерных ЗУ в § 6-3.

Обозначим через I_m минимальный ток, обеспечивающий полное переключение сердечника, и через $I_п$ — максимальное (пороговое) значение тока, при котором еще не происходит переключения. Суммарное значение токов в управляющих шинах $I_x + I_y$, которые должны обеспечивать перемагничивание сердечников при записи и считывании информации, должно быть не менее I_m:

$$I_x + I_y \geqslant I_m. \qquad (6\text{-}35)$$

Импульс тока в одной из управляющих шин не должен перемагничивать сердечники:

$$I_x \leqslant I_п; \qquad (6\text{-}36)$$

$$I_y \leqslant I_п. \qquad (6\text{-}37)$$

В наиболее неблагоприятных случаях отклонений амплитуд импульсов от номинала для нормальной работы ЗУ должны соблюдаться следующие условия:

$$I_{x\,мин} + I_{y\,мин} \geqslant I_m; \qquad (6\text{-}38)$$

$$I_{x\,макс} \leqslant I_п; \qquad (6\text{-}39)$$

$$I_{y\,макс} \leqslant I_п. \qquad (6\text{-}40)$$

Обозначим через δ и ε допустимые относительные отклонения токов I_x и I_y от номинальных значений:

$$\delta = \frac{I_{x\,макс} - I_x}{I_x} = \frac{I_x - I_{x\,мин}}{I_x}; \qquad (6\text{-}41)$$

$$\varepsilon = \frac{I_{y\,макс} - I_y}{I_y} = \frac{I_y - I_{y\,мин}}{I_y}. \qquad (6\text{-}42)$$

Тогда, исходя из выражений (6-38), (6-39) и (6-40), для случая максимального допуска можно написать следующие соотношения:

$$(1 - \delta) I_x + (1 - \varepsilon) I_y = I_m; \qquad (6\text{-}43)$$

$$(1 + \delta) I_x = I_п; \qquad (6\text{-}44)$$

$$(1 + \varepsilon) I_y = I_п. \qquad (6\text{-}45)$$

Введем обозначение

$$\alpha = \frac{I_m}{I_п}. \qquad (6\text{-}46)$$

В результате совместного решения уравнений (6-43), (6-44), (6-45) и (6-46) получим соотношение

$$\frac{1 - \delta}{1 + \delta} + \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} = \alpha. \qquad (6\text{-}47)$$

Уравнением (6-47) определяется взаимная зависимость допусков на управляющие токи в $2^1/_2$-мерном ЗУ при различных величинах параметра α.

На рис. 6-19 изображено семейство кривых, построенных по уравнению (6-47) для различных значений α (кривые $1 \div 6$), линия равных допусков δ и ε (кривая *7*), графики отношений $I_x/I_п = f(\delta)$ (кривая *8*) и $I_y/I_п = f(\varepsilon)$ (кривая *9*), построенные по уравнениям (6-44) и (6-45).

Из рис. 6-19 для типичного значения $\alpha = 1,6$ определяем, что в $2^1/_2$-мерном ЗУ при равенстве допусков относительные допуски на управляющие токи $\delta = \varepsilon = 0,11 = 11\%$.

К недостаткам $2^1/_2$-мерного ЗУ следует отнести отсутствие возможности форсированного перемагничивания сердечников и наличие полувозбужденных сердечников. В данном ЗУ схема прошивки сердечников обмоткой считывания выбирается из условия максимальной компенсации помех от полувозбужденных сердечников, а снижение некомпенсируемых помех осуществляется теми же способами, что и в трехмерном ЗУ: стробирование считываемого сигнала, разделение обмотки считывания на части, сдвиг во времени начала импульсов возбуждения управляющих шин и т. д. [1-11].

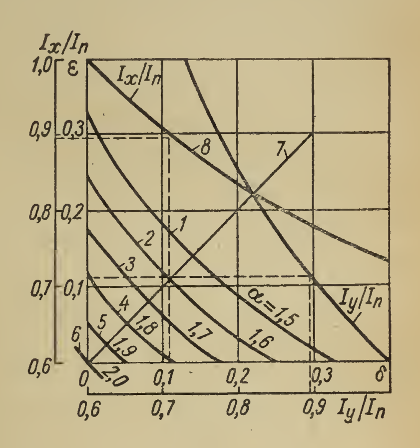


Рис. 6-19. Соотношение токов и допусков на токи управления в $2^1/_2$-мерных ЗУ.

Примером использования $2^1/_2$-мерной схемы может служить ЗУ фирмы «Электроник мемориз» (США) емкостью 16 384 слова длиною до 84 разрядов. Это ЗУ построено на сердечниках с внешним диаметром 0,5 *мм*, и работает с временем обращения 650 *нсек* и временем выборки 300 *нсек* [6-7].

6-5. Сравнение схем запоминающих устройств на ферритовых сердечниках и перспективы их развития

Рассмотренные в предшествующих параграфах двухмерные и трехмерные ЗУ получили широкое распространение в вычислительной технике. Двухмерные ЗУ особенно широко применяются в отечественных ЦВМ, трехмерные — в зарубежных машинах. Впрочем, за рубежом в последние годы начали часто применяться и двухмерные ЗУ, а также недавно разработанные $2^1/_2$-мерные ЗУ. Сравним эти типы ЗУ по некоторым важным показателям.

По быстродействию двухмерные ЗУ могут дать значительно лучшие результаты, чем трехмерные. Объясняется это допустимостью форсирования режима считывания информации, когда ток в числовой шине может принципиально неограниченно,

а практически в несколько раз превышать коэрцитивный ток, а также принципиальной возможностью записи информации под действием напряженности поля, создаваемой током в числовой шине, равным I_m, и током в разрядной шине $I_m/2$. Таким образом, по сравнению с трехмерными в двухмерных ЗУ запись может осуществляться под воздействием напряженности поля, в полтора раза бóльшей, чем при совпадении двух токов. Правда, такое форсирование записи практически не применяется, ибо при этом к сердечникам и к амплитуде импульсов двухмерных ЗУ пришлось бы предъявлять более жесткие требования, чем в трехмерных.

Еще одна причина более высокого быстродействия двухмерных ЗУ заключается в меньшей задержке при прохождении сигнала по шине числовой линейки по сравнению с задержкой при прохождении сигнала по селектирующей шине трехмерного ЗУ. Дело в том, что в первом случае числовая шина Z пронизывает всего n сердечников, где n — количество разрядов, тогда как во втором случае селектирующие шины X и Y прошивают $n\sqrt{m}$ сердечников, где m — количество чисел, хранящихся в ЗУ. Таким образом, задержка прохождения сигнала по шинам оказывается во втором случае примерно в $\sqrt{m}$ раз большей.

С форсированием процессов считывания связана также возможность получения на выходе двухмерных ЗУ сигналов считывания, в несколько раз больших, чем в трехмерных. Если учесть также меньшую величину помех при считывании, то можно считать, что в двухмерных ЗУ отношение сигнала к помехе может быть по крайней мере на порядок выше, чем в трехмерных.

При отбраковке сердечников для трехмерных ЗУ предъявляются значительно более жесткие требования, чем для двухмерных. В последнем случае требования к прямоугольности петли гистерезиса менее высоки и допускается меньшая однородность (больший разброс параметров сердечников).

Гораздо менее жесткие требования в двухмерных ЗУ предъявляются и к стабильности импульсов рабочих токов как по амплитуде, так и по длительности.

Важным преимуществом двухмерных ЗУ, применяемых в отечественных машинах, является более надежное различение информации («0» или «1») по качественному признаку, т. е. по полярности выходного сигнала, в то время как в трехмерных ЗУ сигналы различают по количественному признаку (по амплитуде). Правда, это преимущество достигается применением двух сердечников на разряд, т. е. удвоением общего количества запоминающих сердечников в устройстве.

Наконец, двухмерные ЗУ допускают работу при больших колебаниям температуры. Все это делает их, особенно при относительно небольшой емкости, намного надежнее в эксплуатации, чем трехмерные ЗУ.

Технология прошивки матрицы двухмерного ЗУ более проста, чем трехмерного.

Однако двухмерные ЗУ обладают и рядом существенных недостатков.

Схемы управления этими устройствами значительно сложнее схем управления трехмерных ЗУ. В двухмерных ЗУ на каждое число необходим индивидуальный вентиль, а общее количество адресных линий (где m — емкость ЗУ в числах) гораздо больше количества адресных линий $2\sqrt{m}$ в трехмерных ЗУ. Эта разница становится особенно заметной в ЗУ большой емкости.

Благодаря тому, что в трехмерных ЗУ процессы селекции запоминающих элементов частично осуществляются внутри самого куба памяти, электронные схемы управления ЗУ намного проще и содержат значительно меньшее количество элементов. Выигрыш в количестве электронных элементов возрастает с увеличением емкости ЗУ. Наконец, с точки зрения потребляемой мощности, трехмерные ЗУ большой емкости экономичнее потому, что, во-первых, в их схемах управления меньше активных элементов, а, во-вторых, наличие промежуточных адресных элементов, например координатных трансформаторов с относительно низким к. п. д., требует применения формирователей токов управления бóльшей (раза в два) мощности.

Однако все эти соображения не учитывают того обстоятельства, что при весьма большой емкости стоимость самого накопителя становится наиболее существенной составляющей общей стоимости ЗУ. Это становится особенно заметным при использовании миниатюрных сердечников диаметром менее 1 *мм*.

Так, при анализе стоимости типичного трехмерного ЗУ, сердечники которого прошиты четырьмя проводами, установлено, что при емкости порядка 10^7 *бит* стоимость накопителя достигает 80—90% общей стоимости ЗУ [6-15]. Поэтому для снижения стоимости ЗУ большой емкости нужно обращать особое внимание на снижение стоимости накопителя.

Наиболее трудоемким процессом при изготовлении накопителя является процесс прошивки миниатюрных сердечников, причем сложность прошивки каждым последующим проводом возрастает. Поскольку в трехмерном ЗУ количество проводов, которыми прошиваются сердечники, принципиально по крайней мере на один больше, чем в двухмерном, то стоимость накопителя двухмерного ЗУ оказывается ниже. Эти соображения привели к выводу, что и при сравнительно большой емкости (порядка 8—16 тысяч чисел) целесообразнее строить ЗУ по двухмерной схеме [6-2, 6-19]. При этом одной из мер упрощения адресной части и уменьшения количества сердечников, прошитых каждой разрядной шиной, является считывание одновременно нескольких слов с окончательным выбором нужного слова на выходе числового регистра. Этот метод применен, например, в двухмерном ЗУ фирмы ИБМ емкостью 8192 72-разрядных числа с одновременным считыванием

четырех чисел [6-20]. Это дало возможность снизить количество выходов у дешифратора с 8192 до 2048 и более равномерно нагрузить числовые и разрядные формирователи, что обеспечило уменьшение полного цикла до 375 *нсек*.

Высшим достижением с точки зрения быстродействия ЗУ на ферритовых сердечниках является ЗУ той же фирмы емкостью 8192 72-разрядных числа с одновременным считыванием двух чисел, полный цикл которого доведен до 110 *нсек* за счет применения миниатюрных сердечников с внешним диаметром 0,31 *мм*, работающих в режиме частичного переключения [5-53].

Сравнение традиционных схем трехмерных и двухмерных ЗУ с $2^1/_2$-мерным ЗУ позволяет отметить следующие преимущества последнего.

1. Меньшее количество управляющих проводов в каждом сердечнике, чем в трехмерном ЗУ.

2. Меньшее общее количество периферийного электронного оборудования, чем в двухмерном ЗУ той же емкости.

3. Значительно ме́ньшее число сердечников, прошитых одной разрядной шиной, чем в двухмерном и трехмерном ЗУ.

К недостаткам $2^1/_2$-мерного ЗУ следует отнести отсутствие возможности форсированного перемагничивания сердечников и наличие при считывании помех от полувозбужденных сердечников.

Перечисленные факторы и вытекающие из них электрические и экономические характеристики позволяют сделать вывод о целесообразности построения ЗУ, требующих сочетания большой емкости и высокого быстродействия, по $2^1/_2$-мерной схеме.

Первоначально ЗУ проектировались отдельно для каждого типа ЦВМ, хотя в принципе одно и то же ЗУ, если есть возможность варьировать его емкость, может быть применено для серии различных машин. В связи с этим в последние годы наметилась тенденция проектирования и изготовления рядов ЗУ, основанных на одинаковых схемных и конструктивных принципах, но допускающих более или менее широкий выбор емкости и разрядности чисел в пределах ряда. Это, естественно, позволяет идти на большие затраты для тщательной отработки всех параметров ЗУ и, таким образом, сочетает задачи повышения технического уровня и его экономических показателей.

Таблица 6-1

Тип вычислителя, в котором применено ЗУ	Емкость одного блока ЗУ *байт* (8 *бит*)	Длительность полного цикла, *мксек*	Максимальное количество блоков в ЦВМ	Максимальная емкость ЗУ в ЦВМ тыс. *бит*
70/15	4 096	2,0	2	64
70/25	16 384	1,5	4	590
70/45	69 632	1,44	4	2396
70/55	135 168	0,84	4	4359

В частности, значительных успехов на этом пути добились фирмы «RCA» (США) [1-34] и «Сименс» (ФРГ) [6-16]. В табл. 6-1 приведены показатели ряда трехмерных ЗУ фирмы «RCA», разработанных для семейств ЦВМ «Спектра-70».

В заключение приведем краткие сведения о ЗУ повышенной надежности, в котором не только считывание, но и запись информации могут производиться «полными» (точнее — не ограниченными по амплитуде) токами [6-1, 6-3].

Схема запоминающей матрицы этого ЗУ представлена на рис. 6-20. Каждый запоминающий элемент устройства состоит из сердечника и диода. Элементы, расположенные в одной строке (вдоль шины Z), образуют числовую линейку. Для считывания информации импульс считывания подается в избранную шину Z, как в обычном двухмерном ЗУ, причем на выходах считывания возникают сигналы, отвечающие коду, записанному в сердечнике данной числовой линейки.

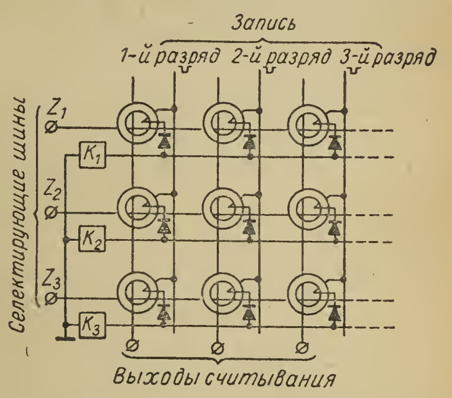


Рис. 6-20. Схема запоминающей матрицы с записью и считыванием полными токами.

Запись новой или регенерация считанной информации осуществляется подачей отрицательных импульсов записи, соответствующих коду записываемого числа, в вертикальные шины записи и одновременным отпиранием ключа K, обеспечивающего выбор ячейки, в которую должно быть записано данное число. Так как токи записи при этом проходят по обмоткам сердечников только избранной ключом числовой ячейки, то и запись, подобно считыванию, может в рассматриваемом ЗУ производиться токами, принципиально не ограниченными по максимуму.

Важными достоинствами описываемого ЗУ являются следующие.

1. Путем форсирования режимов записи и считывания может быть достигнуто значительное повышение быстродействия.

2. При изготовлении матрицы не требуется строгий отбор сердечников по форме петли и однородности параметров.

3. Используя достаточно большие амплитуды импульсов записи и считывания, можно сделать процессы обращения к ЗУ некритичными к изменению параметров этих импульсов, а значит и к колебаниям напряжения питания. Это позволяет упростить элементы схемы управления ЗУ.

4. При считывании информации отсутствуют помехи, связанные с частичным перемагничиванием сердечников.

Указанные свойства схемы значительно повышают надежность ее работы. Однако существенный недостаток схемы заключается в необходимости применения в каждом запоминающем элементе диода — элемента более дорогого и менее надежного, чем сердечник. Кроме того, включение диода, требующее пайки, намного осложняет процесс монтажа и служит серьезным препятствием минимизации габаритов ЗУ.

Рассмотренный принцип построения ЗУ повышенной надежности с записью и считыванием полными токами может быть рекомендован лишь в ЗУ относительно небольшой емкости. В некоторых ЦВМ повышенной надежности применяют полноточные ЗУ с двумя сердечниками на разряд [1-11] и на элементах со сложным магнитопроводом.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ФЕРРИТОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И ЭЛЕМЕНТАХ СО СЛОЖНЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ

7-1. Общие соображения о путях совершенствования ферритовых запоминающих элементов

Увеличение емкости и повышение быстродействия ЗУ неразрывно связано с необходимостью уменьшения размеров магнитных запоминающих элементов. При этом пропорционально уменьшению объема сердечника уменьшается и мощность, необходимая для его перемагничивания. Следовательно, уменьшение всех линейных размеров сердечника в два раза приводит к уменьшению затрачиваемой мощности в восемь раз.

Правда, надо иметь в виду, что уменьшение размеров запоминающих элементов ведет к уменьшению уровня считываемых сигналов. Но так как одновременно могут быть уменьшены управляющие токи, отношение сигнала к помехам, создаваемым наводками от этих токов, ухудшается незначительно.

Гораздо более серьезные трудности возникают при изготовлении сердечников небольших размеров и сборке из них матриц большой емкости. Уменьшение толщины стенки делает сердечники очень хрупкими, а разброс параметров их сильно возрастает. Прошивка проводами большого количества сердечников — трудоемкий процесс, плохо поддающийся механизации. В связи с этим в настоящее время не применяются сердечники с внутренним диаметром меньше 0,2—0,3 *мм*.

Однако дальнейшее уменьшение эффективного размера элемента при одновременном преодолении трудностей сборки накопителей может быть достигнуто на путях интегральной технологии изготовления ферритовых запоминающих матриц. Поиски в этом

направлении привели прежде всего к разработке многоотверстных ферритовых пластин, которые впервые были предложены и экспериментально осуществлены в 1957 г. Райхманом в лаборатории фирмы «RCA» (США) [7-36]. Описанию ЗУ на многоотверстных ферритовых пластинах, получивших дальнейшее развитие и применение в отечественных разработках [1-17, 7-13], посвящается § 7-2.

Другими попытками в этом направлении являются разработки стержневых ферритовых элементов типа «flute» [7-24], ферритовых структур «вафельного типа» [7-26, 7-40] и слоистых ферритовых пластин [7-39]. Последние три типа интегральных запоминающих элементов пока не получили практического применения в ЗУ. В настоящее время продолжаются интенсивные исследования в направлении дальнейшего совершенствования слоистых ферритовых структур. Эти разработки описываются ниже в § 7-3.

Другим существенным недостатком тороидальных ферритовых сердечников при их классическом использовании является разрушение информации при считывании, удлиняющее полный цикл работы ЗУ за счет времени, затрачиваемого на регенерацию. Правда, как уже рассматривалось в § 5-3, предложен ряд методов неразрушающего считывания с обычных сердечников, но все эти методы характеризуются относительно низкой эффективностью, что заключается прежде всего в малой величине считываемого сигнала и отношения сигнал/помеха.

Поэтому, наряду с дальнейшими исследованиями в этой области и разработкой более совершенных и чувствительных методов выделения сигнала из помех, предложен ряд специальных запоминающих элементов, допускающих неразрушающее считывание информации. Все эти элементы можно условно разделить на две группы: а) элементы, основанные на взаимодействии магнитных потоков (биакс, «пуговица», с модуляцией магнитного сопротивления — ММС), которые описываются в § 7-4, и б) элементы, основанные на перераспределении магнитных потоков (трансфлюксоры, флюксоры, бифлаксы), описанные в § 7-5.

7-2. Запоминающие устройства на многоотверстных ферритовых пластинах

Для объяснения принципа использования многоотверстных ферритовых пластин в качестве устройств хранения информации рассмотрим рис. 7-1, *а*. Здесь изображен в увеличенном масштабе разрез участка ферритовой пластины с отверстиями радиусом r_0 и шагом R. Сквозь отверстия продеты провода, по которым могут пропускаться импульсы тока, предназначенные для изменения магнитного состояния феррита в окрестности отверстия. Ток I, протекающий по проводу, создает вокруг последнего магнитное поле, напряженность которого H убывает по мере удаления от провода (рис. 7-1, *б*). Под действием этого поля будет происходить

перемагничивание некоторой кольцевой зоны феррита вокруг отверстия. Ширина этой зоны определяется амплитудой импульсов тока.

Применяя принцип перемагничивания по слоям, можно считать, что каждый концентрический слой перемагничивается независимо от соседних областей пластины. Напряженность внешнего поля, возникающая под действием тока I в слое радиусом r, может быть вычислена с помощью выражения

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \tag{7-1}$$

которое получается при применении закона полного тока.

В случае действия двухполярных импульсов в перемагничиваемом материале вокруг отверстия можно выделить три зоны.

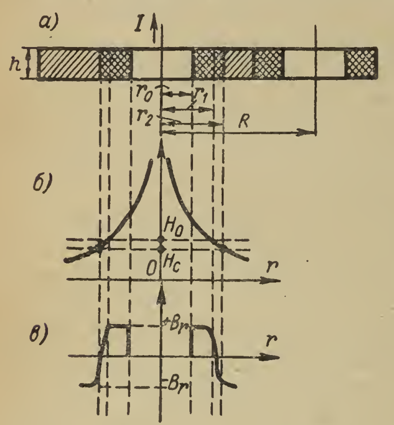


Рис. 7-1. Запоминающие элементы на многоотверстной ферритовой пластине: *а* — разрез пластины; *б* — распределение напряженности магнитного поля; *в* — распределение индукции вокруг отверстия.

1. Зона радиусом r_1, в которой

$$\int_0^t (H - H_0)\,dt > S_w, \tag{7-2}$$

где S_w — коэффициент переключения феррита; H_0 — поле старта.

Здесь перемагничивание происходит по полному циклу гистерезиса от $-B_r$ до $+B_r$ (рис. 7-1,*в*).

2. Зона в кольце шириной $r_2 - r_1$, где

$$\int_0^t (H - H_0)\,dt < S_w, \tag{7-3}$$

но напряженность поля превосходит коэрцитивную силу ($H > H_c$). В этой области индукция меняется по частным циклам, которые зависят от предыдущего состояния намагниченности.

3. Зона, для которой $r > r_2$, где

$$H < H_c. \tag{7-4}$$

Здесь происходят только обратимые изменения индукции.

На рис. 7-1, *в* показано распределение индукции в феррите вокруг отверстия. В исходном положении феррит был намагничен до индукции $-B_r$, после действия тока I в феррите вокруг отверстия произошло изменение индукции.

Сигнал, получающийся при перемагничивании запоминающего элемента на многоотверстной ферритовой пластине, создается всеми тремя зонами. Сравнивая петлю гистерезиса сердечника

с петлей гистерезиса элемента на многоотверстной пластине, можно увидеть, что во втором случае петля гораздо менее соответствует идеальной. Это объясняется влиянием второй и третьей зон, которых не существует в сердечнике при перемагничивании его достаточно большим током. Поэтому отношение сигнала считывания «1» к сигналу считывания «0» при применении многоотверстных пластин в два-три раза хуже, чем в тороидальных сердечниках.

Существенной особенностью ЗУ на многоотверстных пластинах является наличие общей магнитной среды у соседних запоминающих элементов. Это может приводить к влиянию при обращении к одному из элементов на информацию, хранящуюся в соседних элементах.

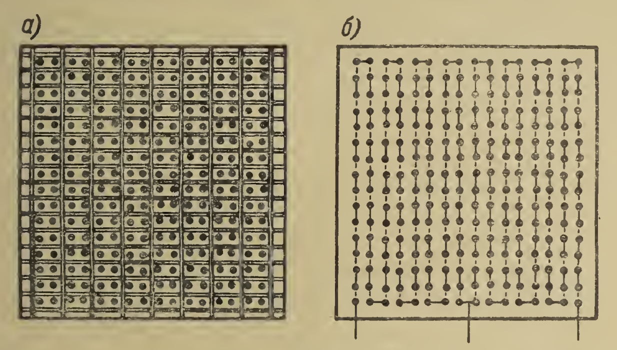


Рис. 7-2. Многоотверстная ферритовая пластина с 256 отверстиями, полученная методом литья под давлением: *а* — внешний вид пластины; *б* — схема печатной обмотки.

Такое положение накладывает особые условия на расчет и проектирование ЗУ на многоотверстных пластинах.

Недостатком многоотверстных пластин по сравнению с сердечниками является следующее обстоятельство. Если сердечники для ЗУ могут быть отобраны с какой угодно точностью, то на многоотверстных пластинах гораздо труднее получить высокую однородность магнитных характеристик отдельных элементов.

Худшее отношение сигналов считывания «1» и «0» и бóльшие разбросы магнитных характеристик отдельных элементов заставляют строить ЗУ на многоотверстных ферритовых пластинах, как правило, по двухмерной схеме с двумя отверстиями на разряд.

Большим достоинством многоотверстных пластин (см. рис. 7-2, *а*) является возможность нанесения на них печатных обмоток. Схема печатной обмотки приведена на рис. 7-2, *б*. Большое удельное сопротивление феррита (примерно 10^8 *ом·см*) позволяет наносить печатную обмотку непосредственно на феррит. Наличие печатных обмоток существенно упрощает сборку ЗУ из многоотверстных ферритовых пластин даже при небольших размерах отверстий.

В литературе [7-8] описаны конструкция и технология пластин отечественного производства. Эти пластины имеют форму прямоугольника с размерами 26,4×26,4 *мм* и толщиной 1,1 *мм*. В пластине имеется 256 отверстий диаметром 0,56 *мм* (рис. 7-2). Для образования обмотки, проходящей последовательно через все отверстия, на пластине сделаны ребра, которые сошлифовываются после ее металлизации.

Пластины изготавливаются из магний-марганцевого феррита марки 1,3ВТ методом литья под давлением в специальных металлических формах и последующим спеканием, в процессе которого образуются взаимные твердые растворы.

Обмотка на пластины наносится способом металлизации — путем химического осаждения серебра с последующим гальваническим наращиванием его. После предварительного химического серебрения на шлифовальном станке с пластин сошлифовываются ребра. Толщина слоя серебра при гальваническом наращивании увеличивается до 10 *мк*, и сопротивление обмотки становится равным примерно 1 *ом*.

Описанный технологический процесс изготовления ферритовых пластин — не единственно возможный. Он обладает рядом недостатков, особенно при небольших размерах отверстий пластин. Неодинаковая усадка ферритовых пластин и отдельных их участков во время обжига, обусловленная неоднородностью физической структуры, различной температурой в разных участках обжигательной печи и рядом других причин, приводит к тому, что отверстия в пакете обожженных пластин могут не совпадать друг с другом. По мере уменьшения размеров отверстий относительные размеры смещения отдельных отверстий возрастают.

Гораздо большую точность обеспечивает технологический процесс, основу которого составляет сверление отверстий в предварительно обожженной ферритовой пластине. Сверление производится ультразвуком с помощью специального многозубного инструмента «ерша» [1-17, 7-14], позволяющего получить сразу все отверстия на пластине. При такой технологии точность расположения отверстий на пластине определяется точностью изготовления инструмента и может быть достаточно высокой. Этим способом изготавливаются пластины с отверстиями диаметром до 0,2—0,3 *мм*.

В пластинах небольшого размера трудно получить ребра, необходимые для образования обмотки. В этом случае применяется метод фотопечати, заключающийся в том, что на предварительно металлизированную пластину фотографируется соответствующий рисунок, после травления которого образуется печатная обмотка.

В [7-38] описан способ сверления микроотверстий электронным лучом. Эта технология позволила получить на пластине размером 2×2×0,25 *мм* четыре отверстия диаметром 0,025 *мм* с перемычкой между отверстиями шириной 0,025 *мм*.

Повышение быстродействия ЗУ на многоотверстных ферритовых пластинах может быть осуществлено так же, как в ЗУ на тори-

дальных сердечниках, форсированием режима перемагничивания при записи и считывании информации. Однако на ферритовых пластинах, в которых расстояние между любыми отверстиями одинаково, форсирование, т. е. увеличение управляющих токов ограничено опасностью стирания информации в соседних запоминающих элементах. Даже если импульсы тока имеют небольшую длительность, их многократное воздействие на магнитный материал, принадлежащий соседнему элементу, приведет к стиранию информации. С этой точки зрения многоотверстные пластины существенно уступают тороидальным сердечникам.

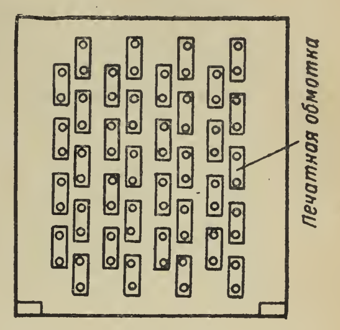


Рис. 7-3. Пластина со сближенными отверстиями.

В 1961 г. Ф. Г. Старосом и И. В. Бергом была предложена так называемая «многоотверстная ферритовая пластина со сближенными отверстиями» [7-6]. На рис. 7-3 изображена такая пластина и печатная обмотка на ней Расстояние между двумя отверстиями, входящими в запоминающий элемент, меньше, чем расстояние до соседнего элемента.

Сближение отверстий полностью устраняет взаимное влияние соседних запоминающих элементов. Действительно, когда поток в перемычке достигает насыщения, дальнейшее возрастание тока не может привести к увеличению количества силовых линий в перемычке, а следовательно, не могут появиться линии индукции, заходящие в область пластины, принадлежащую соседнему запоминающему элементу. Взаимного влияния не будет, если расстояние между элементами больше, чем удвоенная величина перемычки внутри элемента.

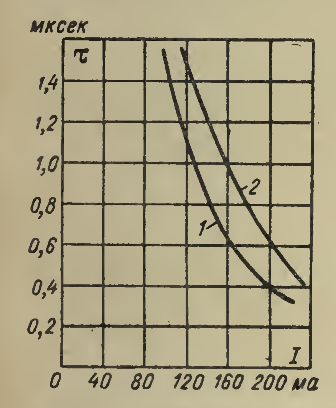


Рис. 7-4. Зависимость времени перемагничивания от тока.
1 — для запоминающего элемента со сближенными отверстиями; *2* — для одного отверстия.

На рис. 7-4 приведена зависимость времени перемагничивания элемента со сближенными отверстиями от перемагничивающего тока (кривая *1*). Эта зависимость снята на пластине из феррита марки 0,7ВТ. Диаметр отверстий пластины равен 0,25 *мм*, перемычка между ними составляет 0,2 *мм*. Для сравнения показана аналогичная зависимость для элемента из одного отверстия (кривая *2*), причем нарастание магнитного потока ограничено соседним отверстием, в котором не проходит ток.

На многоотверстных пластинах могут быть достигнуты высокие скорости перемагничивания, если перемагничивание осуще-

ствлять по частным циклам петли гистерезиса. В таком режиме время перемагничивания может быть доведено до нескольких десятков наносекунд.

Таким образом, пластина со сближенными отверстиями сочетает в себе преимущества многоотверстных пластин и тороидальных сердечников.

На ферритовых многоотверстных пластинах можно строить как двухмерные так и трехмерные ЗУ. Однако в последних отверстие запоминающего элемента должно быть прошито четырьмя или, по крайней мере, тремя проводами, что требует увеличения диаметра отверстия и, таким образом, сводит на нет такое преимущество пластин по сравнению с сердечниками, как большие возможности миниатюризации запоминающих элементов и управляющих

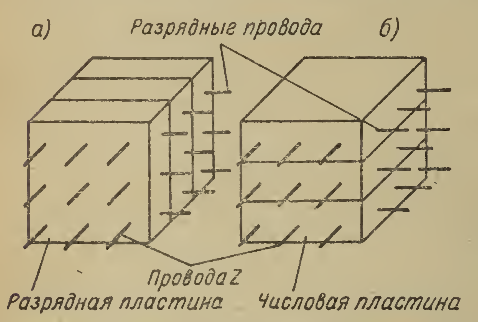


Рис. 7-5. Конструктивные схемы двухмерных ЗУ на многоотверстных ферритовых пластинах: *а* — с разрядными пластинами; *б* — с числовыми пластинами.

Рис. 7-6. ЗУ с разрядными пластинами. Метод прошивки проводов *Z*.

токов. Кроме того, совмещение большого числа элементов в одной ферритовой детали при повышенных требованиях к их однородности, предъявляемых в трехмерных ЗУ, приводит к существенному снижению выхода годных изделий.

Как показано в [6-6], в ЗУ емкостью 1000 чисел для обеспечения отношения сигнала к помехе 4 : 1 необходимо выдерживать импульсные характеристики отдельных запоминающих элементов в пределах 2—2,5%, что на многоотверстных пластинах трудно достижимо. Известны, тем не менее, попытки создания на многоотверстных пластинах ЗУ с совпадением токов [7-36].

На рис. 7-5 изображены два варианта конструктивных схем двухмерных ЗУ с разрядными и числовыми пластинами. В ЗУ с разрядными пластинам каждая из них служит для хранения одного разряда всех чисел. В ЗУ с числовыми пластинами каждая пластина предназначена для хранения всех разрядов одного или нескольких чисел.

Рассмотрим особенности ЗУ с разрядными пластинами. Через каждое отверстие пакета пластин (рис. 7-6) в этом типе ЗУ про-

шивается один провод — провод Z. Для компенсации непрямоугольности петли гистерезиса запоминающего элемента, а также для того, чтобы нагрузка дешифратора не зависела от кода числа, записанного по данному адресу, в каждый элемент входят два отверстия. Эти отверстия могут находиться на разных пластинах (для чего на каждый разряд применяются две пластины) либо на одной пластине. В последнем случае запоминающий элемент

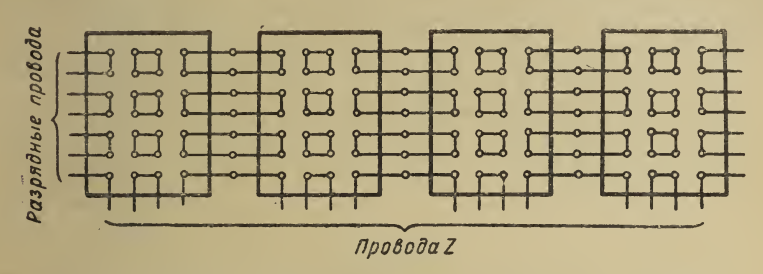


Рис. 7-7. Плоская конструкция ЗУ с числовыми пластинами.

состоит из двух отверстий, выбранных так, что направление токов в разрядной обмотке в одном отверстии совпадает с током в проводе Z, а в другом отверстии оно противоположно ему. Такими отверстиями являются накрест лежащие отверстия. Провода Z соединяются на другой стороне перемычкой.

ЗУ с числовыми пластинами в принципе не отличаются от устройств с разрядными пластинами; однако они имеют некоторые особенности. К числу таких особенностей следует отнести возможность создания плоской конструкции ЗУ (рис. 7-7), не требующей прошивки проводом Z большого количества пластин. Прошивка проводом Z делается особенно сложной при сборке ЗУ из миниатюрных пластин с отверстиями небольшого диаметра. Применение двухслойного печатного монтажа дает возможность обойтись при сборке таких устройств вообще без операции прошивки. В этом случае в нижнем слое наносятся провода Z, а в верхнем — разрядные провода.

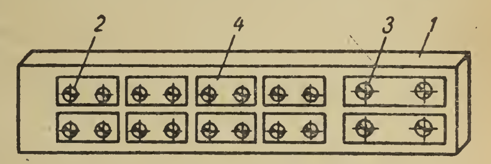


Рис. 7-8. Числовая пластина, совмещенная с дешифратором.

1 — ферритовая пластина; 2 — отверстия запоминающих элементов; 3 — отверстия ячейки дешифратора; 4 — печатный провод Z.

Второй особенностью числовых пластин является то, что стирание информации токами в соседнем отверстии не происходит, так как все отверстия одного числа возбуждаются при записи и считывании информации одновременно.

В ЗУ, построенных на основе числовых пластин, возможно совмещение на одной пластине запоминающей и дешифраторной

частей [7-13]. С этой целью на каждой пластине размещены одно или несколько отверстий относительно большого диаметра, предназначенных для дешифратора (рис. 7-8). Отверстия запоминающих элементов и отверстия дешифратора имеют общую печатную обмотку, представляющую собой провод Z. При сборке таких пластин запоминающие отверстия соединяются между собой разрядными проводами, отверстия дешифраторов соответствующим образом соединяются проводами X и Y. На одной ферритовой пластине может быть размещено несколько таких элементов.

Ряд дальнейших усовершенствований, внесенных в многоотверстные ферритовые пластины и схемы их применения в ЗУ делает их конкурентоспособными с лучшими разработками ЗУ на ферритовых сердечниках, а в некоторых случаях с ЗУ на магнитных пленках [7-13].

7-3. Слоистые ферритовые пластины и другие интегральные элементы

Дальнейшее развитие интегральных методов технологии делает желательным создание конструкции ЗУ, которая позволила бы избежать такой трудно механизируемой операции, как продевание проводов в отверстия запоминающих элементов. Естественным решением этого вопроса является конструкция, в которой система проводников тем или иным способом помещена в среду из феррита. Однако трудность создания такой конструкции связана с тем, что при высоких температурах обжига ферритов обычные проводниковые материалы плавятся. Это противоречие наиболее удачно удалось разрешить разработчикам фирмы «RCA» [1-34, 7-22, 7-39], создавшим так называемые ламинарные (слоистые) ферриты.

Первые публикации о слоистых ЗУ появились в 1963 г., а за последние два года в их разработке достигнуты существенные успехи и практически показана эффективность этого метода миниатюризации. В [7-22] приведены подробные сведения о разработке и технологическом процессе изготовления слоистых матриц. Этапы этого процесса поясняются рис. 7-9. На подложку из стекла через специальную маску продавливается палладиевая паста, образующая проводники. После удаления маски на подложку наносится суспензия, состоящая из ферритового порошкового состава Fe—Mg—Mn—Zn, винипласта и пластификатора, взвешенного в метилэтилкетоне. Когда последний испаряется, то остается слой феррита. После сушки ферритовый слой отделяется от стекла, причем на этом слое остаются проводящие линии из палладия, которые были нанесены на стекло ранее. Две такие пластины (рис. 7-9, *а* и *б*) склеивают проводниками внутрь, разделяя их тонкой ферритовой пластиной (рис. 7-9, *в*) без проводников. При этом проводники верхней и нижней пластин взаимно перпендикулярны (рис. 7-9, *г*, *д*). Обжиг сжатых в пакет пластин

ведется в два этапа. На первом происходит выжигание связующих веществ, а на втором — образование феррита.

Готовая матрица размером $25\times25\times0{,}15$ *мм* имеет в двух взаимно перпендикулярных направлениях по 64 проводника, расположенных с шагом 0,37 *мм*. Каждое пересечение проводников эквивалентно сердечнику. Два таких элемента используются для хранения одного бита. ЗУ строится по двухмерной системе. Таким образом, матрица имеет емкость 64 32-разрядных числа. В отличие от обычного кольцевого сердечника, запоминающий элемент, образованный перекрестием проводников, расположенных

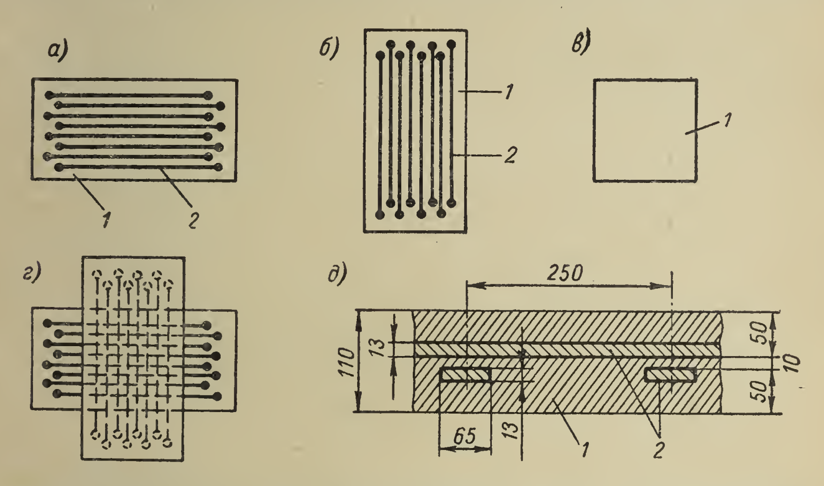


Рис. 7-9. Матрица ЗУ на слоистых ферритах: *а*, *б* и *в* — исходные ферритовые слои с проводниками; *г* — матрица в сборке; *д* — поперечное сечение матрицы (размеры в *мкм*).

1 — феррит; *2* — проводники.

в сплошной среде, может работать в режиме неразрушающего считывания на основе действия ортогональных потоков. Запись информации производится при совпадении токов во взаимно перпендикулярных проводниках, при этом информация определяется направлением разрядного тока.

Режимы работы запоминающих элементов приведены в табл. 7-1. Запоминающие элементы в слоистой матрице отличаются от обычных тороидальных сердечников меньшей эффективностью, так как падение напряжения на одном элементе в числовой шине значительно больше, чем сигнал считывания. Это связано с тем, что только часть магнитного потока, переключающегося вокруг числового провода, сцепляется с разрядным проводом. Однако небольшие размеры запоминающих элементов приводят к тому, что управляющие токи и напряжения оказываются не больше, чем при использовании миниатюрных сердечников.

Таблица 7-1

Ток считывания			Ток записи — числовой		Ток записи — разрядный		Амплитуда сигнала считывания, *мв*	Падение напряжения в числовом проводе на один элемент, *мв*
амплитуда, *ма*	длительность, *нсек*	фронт, *нсек*	амплитуда, *ма*	длительность, *нсек*	амплитуда, *ма*	длительность, *нсек*		
400	110	45	100	120	30	200	45	250
400	60	30	150	30	30	100	35	320

Выбор двухмерной схемы ЗУ на слоистых ферритах диктуется трудностями получения однородных характеристик запоминающих элементов при интегральной технологии. Разброс сигналов считывания в пределах одной матрицы составляет 17—58 *мв*, что совершенно недопустимо в трехмерном ЗУ, но не является препятствием для построения двухмерного ЗУ. Предполагается освоить производство матриц по 256 32-разрядных чисел, что дает плотность 1600 элементов на квадратный сантиметр. Очень малые размеры запоминающих элементов позволили применять в дешифраторе адреса миниатюрные интегральные диоды. Поскольку уже разработаны все остальные электронные схемы ЗУ в интегральном исполнении (усилители считывания, ключевые схемы, логические элементы и т. д.), то с использованием слоистых ферритов появляется возможность строить ЗУ полностью на интегральных элементах.

Еще одним типом матрицы интегрального магнитного ЗУ является матрица вафельного типа [7-26], представляющая собой пластину из феррита с непрямоугольной петлей гистерезиса с ортогональными канавками, в которые укладываются разрядные и числовые шины. Носителем информации здесь служит тонкий железо-никелевый слой, нанесенный на медную подложку. Этот слой обладает прямоугольной петлей гистерезиса и имеет изотропные свойства. Более подробные сведения о физике процессов в матрицах вафельного типа и характеристиках построенных на них макетов ЗУ приведены в [1-2].

Во всех рассмотренных ЗУ, изготовляемых интегральными методами, важнейшей проблемой является однородность свойств отдельных элементов, определяющая процент выхода годных матриц, который в свою очередь зависит от частоты появления дефектных элементов. Если характер распределения дефектов в матрице таков, что негодные запоминающие элементы располагаются вдоль одного числа либо вдоль одного разряда, то введение нескольких дополнительных числовых и разрядных шин значительно увеличивает выход годных. В работе [7-32] дан анализ этой проблемы с учетом статистического характера распределения дефектов. Показано, что если вероятность появления дефектного элемента равна 0,001, то для ЗУ емкостью 10^8 *бит* необходимо иметь в запасе 5% числовых и 4% разрядных линий.

7-4. Элементы, основанные на взаимодействии магнитных потоков

Успешное решение важной задачи неразрушающего считывания информации может быть в принципе осуществлено применением методов неразрушающего считывания поперечным полем.

Однако общими недостатками перечисленных выше методов (см. § 5-4) практической реализации неразрушающего считывания поперечным полем являются технологические трудности, связанные с изготовлением запоминающих элементов, и низкая экономичность их работы. Для создания поперечного поля требуется, как правило, большая мощность, на два-три порядка превышающая мощность полезного сигнала, получаемую на выходе обмотки считывания запоминающего элемента.

Первым практически приемлемым ферромагнитным элементом со считыванием поперечным полем можно считать разработанный в 1959 г. фирмой «Форд моторс» (США) элемент — биакс, предназначенный для запоминающих устройств и логических схем [7-42].

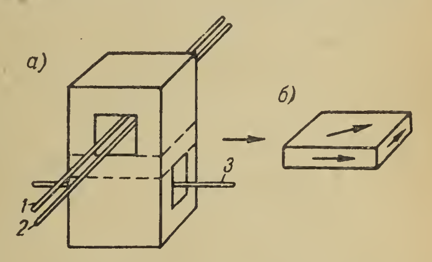


Рис. 7-10. Конструкция биакса (*а*) и ориентация магнитного потока в перемычке между отверстиями (*б*).

Биакс, предназначенный для запоминания информации, представляет собой ферритовый параллелепипед (рис. 7-10, *а*) с двумя сквозными отверстиями круглого, прямоугольного или квадратного сечения; оси отверстий взаимно перпендикулярны. Этим обусловлено название элемента от слова биаксиальный, т. е. двухосевой. Описанные элементы имеют размеры 1,27×1,27××2,1 *мм*, при размерах сечения отверстий 0,5×0,5 *мм* и толщине верхних стенок 0,375 *мм*.

Одно из отверстий, например, верхнее, служит для записи информации. Через это отверстие проходят проводники *1* и *2*, позволяющие осуществлять запись по методу совпадения токов. При считывании один из этих проводников может быть использован в качестве обмотки считывания. Через другое, нижнее отверстие, продевается провод *3*, по которому при считывании информации пропускаются опросные или считывающие импульсы тока.

Рабочей зоной биакса, в которой в основном происходят процессы неразрушающего считывания поперечным полем, является внутренняя стенка (перемычка между отверстиями), показанная отдельно на рис. 7-10, *б*. В этой зоне под влиянием поперечного поля происходит поворот вектора остаточной индукции на некоторый угол, зависящий от напряженности поперечного поля (см. рис. 5-14 и пояснения к нему).

Время неразрушающего считывания из биакса зависит от многих факторов и, в частности, от свойств материала и амплитуды и крутизны фронта импульсов опроса. При благоприятных условиях это время может составлять 0,1—0,2 *мксек* и менее.

Тактовая частота опроса в ЗУ на биаксах может достигать 10 *Мгц*, причем не наблюдается существенного нагрева элементов. Биаксы, изготовленные из феррита с точкой Кюри 180° С, работали нормально при температуре окружающей среды до 125° С.

В описанном выше симметричном биаксе, любой из магнитопроводов которого может быть использован и для записи и для считывания информации, конструкция и материал, должны удовлетворять и тем и другим требованиям. Для того чтобы лучше удовлетворять специфическим требованиям, предъявляемым к магнитопроводам записи и считывания, а также для облегчения процессов проверки и монтажа, в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР была предложена конструкция несимметричного биакса [7-7], внешний вид и размеры которого приведены на рис. 7-11.

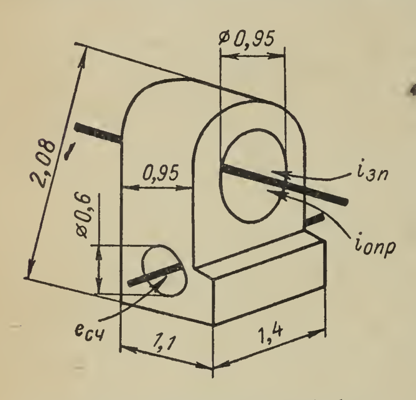


Рис. 7-11. Несимметричный биакс разработки ИТМ и ВТ АН СССР.

На этих биаксах был построен типовой модуль ЗУ с неразрушающим считыванием информации емкостью 256 48-разрядных чисел.

Стремление уменьшить габариты ЗУ и величины управляющих токов привело к созданию несколькими американскими фирмами биаксов в миниатюризированном исполнении (микробиаксов). Так, фирма «Рейтеон компютер» [7-25] изготовляет биаксы с размерами: 0,76×0,76×1,27 *мм*, объем феррита которых в 5 раз меньше стандартных биаксов. На этих биаксах фирмой «Ханиуэлл» построено ЗУ емкостью 4096 25-разрядных слов для ЦВМ авиационных объектов [7-31].

Интересна попытка фирмы «RCA» [7-41] создания микробиаксов путем сверления лазером ортогональных отверстий диаметром несколько микрон в куске пермаллоевой проволоки.

Кроме описанных элементов с взаимно перпендикулярными отверстиями, позднее предложен ряд элементов с неразрушающим считыванием, основанных на взаимодействии остаточного потока и опросного поля, создаваемых проводниками в коллинеарных отверстиях [7-27, 7-28 и др.]. Достоинством таких элементов является их технологичность.

Отечественный элемент подобного типа, предложенный Т. К. Цогоевым [7-20], показан на рис. 7-12, *а*. Внешне этот плоский биакс напоминает круглую пуговицу с четырьмя отверстиями.

Запись информации может быть произведена пропусканием тока в том или ином направлении, причем вокруг отверстий *1* и *3* возникают остаточные магнитные потоки соответственно по часовой и против часовой стрелки (или наоборот), а перемычка между отверстиями намагничивается в направлении, показанном стрелкой, или в противоположном направлении.

При пропускании по опросному проводу тока $i_{\text{опр}}$ возникает круговое поле вокруг отверстий *2* и *4* и в перемычке между отверстиями — перпендикулярное остаточному потоку. Это вызывает поворот остаточного вектора намагниченности на некоторый угол и, следовательно, индукцию в горизонтальном проводе э. д. с. считывания *e*. Сигналы считывания «1» и «0» отличаются друг от друга своей полярностью. Процессы считывания информации

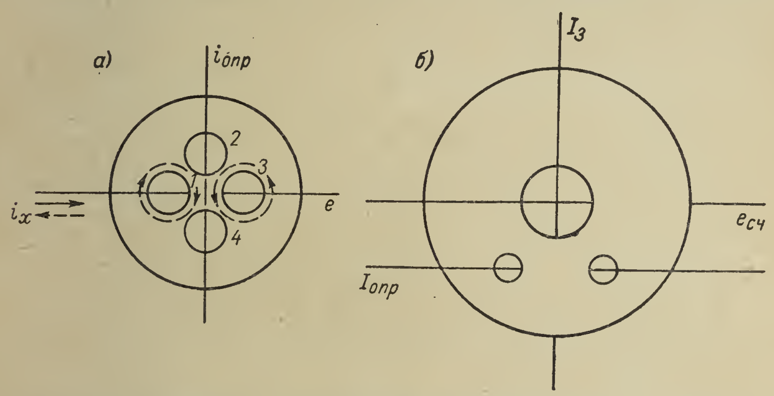


Рис. 7-12. Элементы с коллинеарными отверстиями: *а* — «плоский биакс»; *б* — с модуляцией магнитного сопротивления (ММС).

могут быть объяснены также на основе представлений об изменении магнитной проницаемости в зоне магнитного взаимодействия [7-16].

Преимуществом элементов с коллинеарными отверстиями является возможность их изготовления в интегральном исполнении. В частности можно использовать и участки описанных выше многоотверстных ферритовых пластин. При этом запоминающие элементы могут образовываться двумя или более отверстиями и перемычками между ними, играющими роль рабочих зон (зон магнитного взаимодействия).

Около 10 лет назад А. Е. Ашманом предложен оригинальный запоминающий элемент с модуляцией магнитного сопротивления, получивший сокращенное название элемента ММС [7-1]. Элемент представляет собой сердечник с тремя отверстиями, изготавливаемый, как правило, из магнитомягкого материала с непрямоугольной петлей гистерезиса.

Типичная конфигурация его представлена на рис. 7-12, *б* [7-3]. Запись информации заключается в намагничивании сердечника

током i_1 до состояния остаточной индукции $+B_r$ или $-B_r$. Считывание осуществляется током опроса, который подается в обмотку, проходящую через симметричные модуляционные отверстия. Небольшая область, в которой локализуется поле, называется модулируемым магнитопроводом. Остальная часть сердечника, практически не подверженная воздействию поля опросного тока, служит запоминающим (рабочим) магнитопроводом.

Физика процесса неразрушающего считывания в элементе ММС заключается в следующем. При насыщении током опроса

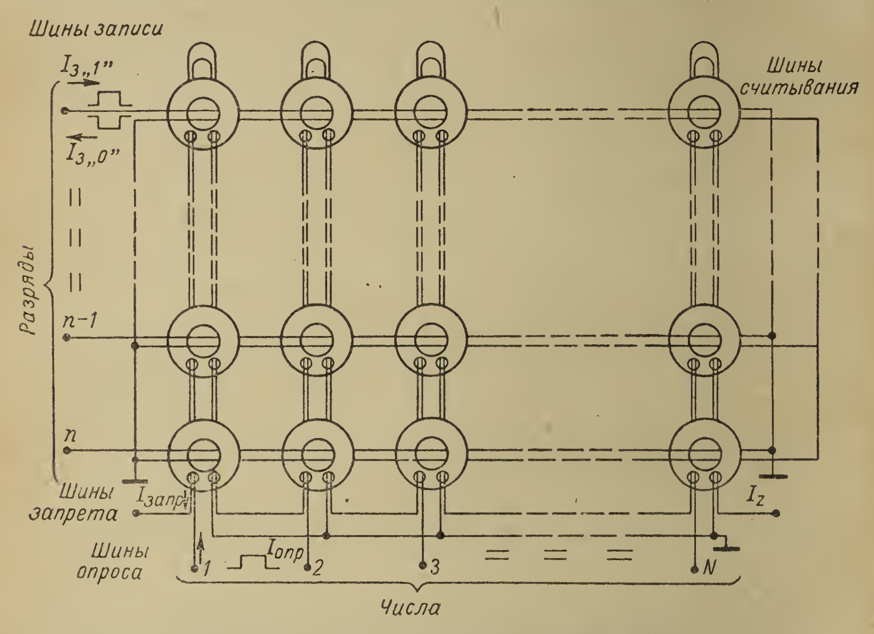


Рис. 7-13. Схема матрицы на элементах ММС.

перемычек вокруг модуляционных отверстий магнитное сопротивление модулируемого магнитопровода возрастает и в рабочем магнитопроводе возбуждается размагничивающее поле $H_р$, уменьшающее рабочий поток $\Phi_р$. В результате в проводе считывания индуктируется двухполярный сигнал $e_{сч}$, фаза которого определяется направлением потока $\Phi_р$, т. е. значением информации, хранящейся в элементе («1» или «0»).

Для выборочной записи информации в элементах ММС, работающих в составе ЗУ, автором разработки предложен метод [7-2], суть которого заключается в следующем. Запись информации в элементе осуществляется лишь в том случае, если на него воздействует только один ток записи в разрядной шине. При одновременном воздействии на элемент тока записи и тока запрета в рабочем магнитопроводе возникает дополнительное внутреннее

поле размагничивания, направленное навстречу полю записи и, при соответствующем подборе величин токов, предотвращающее перемагничивание сердечника.

В одном из вариантов схемы матрицы двухмерного ЗУ на элементах ММС (рис. 7-13) используется ток запрета $I_{запр}$, протекающий по шине запрета, которой прошиты все элементы. Для записи числа в определенной числовой ячейке, в ее шину опроса подается импульс тока $I_{опр} = -I_{запр}$, компенсирующий действие тока запрета в элементах выбранной числовой ячейки.

На элементах ММС могут строиться оперативные, постоянные и ассоциативные ЗУ.

7-5. Элементы, основанные на перераспределении магнитных потоков

Простейшие элементы с перераспределением магнитного потока представляют собой конструктивно ферритовые сердечники с двумя или более отверстиями. Обмотки, которые проходят сквозь эти отверстия, позволяют управлять распределением магнитного потока в таком разветвленном магнитопроводе. Элементы этого типа,

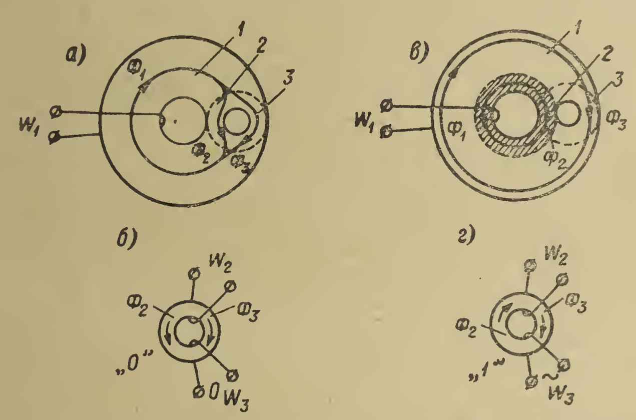


Рис. 7-14. Принцип действия трансфлюксора с двумя отверстиями: *а* — трансфлюксор в заблокированном (запертом) состоянии; *б* — область вокруг малого отверстия у запертого трансфлюксора; *в* — трансфлюксор в разблокированном состоянии (открытом); *г* — область вокруг малого отверстия у открытого трансфлюксора.

впервые описанные в 1955—1956 гг. Райхманом и Лоу [7-33, 7-34], были названы авторами трансфлюксорами (от («trans» — приставка, означающая «через», «пере», и «flux» — поток).

Простейший трансфлюксор изображен на рис. 7-14. Он представляет собой сердечник, изготовленный из феррита с ППГ, с двумя круглыми отверстиями неравного диаметра. Расположение

отверстий таково, что в магнитопроводе можно выделить три типичных участка *1*, *2* и *3*, причем площади поперечного сечения участков *2* и *3* одинаковы, а площадь сечения участка *1* равна или больше суммы площадей сечений участков *2* и *3*. В соответствии с законом Кирхгофа для магнитной цепи результирующий магнитный поток Φ_1 в сечении *1* трансфлюксора всегда равен алгебраической сумме потоков Φ_2 и Φ_3 в сечениях *2* и *3*.

Условимся считать исходным состоянием трансфлюксора, соответствующим записи в нем кода «0», такое состояние, когда весь сердечник намагничен до насыщения в одном и том же (безразлично в каком) направлении. Пусть в рассматриваемом нами случае он намагничен до насыщения по часовой стрелке, как показано на рис. 7-14, *а*. Для того чтобы привести трансфлюксор в исходное состояние, нужно, очевидно, пропустить импульс тока соответствующего направления и достаточной величины по входной обмотке (обмотке записи) W_1.

Рассмотрим теперь отдельно зону сердечника вокруг малого отверстия (рис. 7-14, *б*), которая на рис. 7-14, *а* обведена пунктиром. Будем для удобства называть эту зону в дальнейшем малым кольцом. Его можно, очевидно, рассматривать в первом приближении как автономный тороидальный сердечник, намагниченный до насыщения таким образом, что магнитные потоки в правом и левом полукольцах имеют направление «сверху вниз» и замыкаются далее через некоторую внешнюю (по отношению к малому кольцу) среду.

На малом кольце размещены две обмотки: обмотка опроса, или приводная обмотка, W_2 и обмотка считывания, или выходная обмотка, W_3. Подадим в обмотку W_2 переменный ток с такой амплитудой, чтобы создаваемая им м. д. с. была достаточна для изменения магнитного состояния малого кольца, но не могла бы изменить магнитного состояния всего сердечника трансфлюксора, т. е. чтобы создаваемая этим током напряженность поля в сечениях *2* и *3* превышала коэрцитивную силу материала, а в сечение *1* была менее коэрцитивной силы.

Тогда м. д. с., создаваемая током обмотки опроса, в один полупериод будет совпадать по направлению с током Φ_2 в левом плече малого кольца, а в другой полупериод — с потоком Φ_3 в правом плече этого кольца. Однако, так как весь материал находится в состоянии насыщения и, следовательно, дальнейшее увеличение в нем магнитной индукции невозможно, то из-за непрерывности потока последний в малом кольце в идеальном случае изменяться не будет и в выходной обмотке W_3 не будет индуктироваться э. д. с. Фактически, вследствие неидеальной прямоугольности петли гистерезиса материала, индукция в нем может изменяться в пределах от B_r до B_s, и в выходной обмотке будет индуктироваться весьма незначительная э. д. с. — тем ме́ньшая, чем лучше прямоугольность петли. Это состояние трансфлюксора, при котором практически отсутствует трансформаторная

связь между обмотками W_2 и W_3, называют состоянием блокировки, заблокированным или запертым состоянием.

Для разблокировки трансфлюксора, т. е. для записи в нем «1», по обмотке W_1 нужно пропустить так называемый установочный, отпирающий или разблокирующий импульс тока, создающий м. д. с., противоположную по направлению магнитному потоку в трансфлюксоре.

В рассматриваемом случае м. д. с. установки должна быть направлена в трансфлюксоре против часовой стрелки. Величина установочного импульса нормируется таким образом, чтобы он создавал напряженность поля, недостаточную для перемагничивания всего сердечника, но достаточную для реверсирования магнитного потока во внутренних слоях большого магнитопровода, а именно, в пределах заштрихованного кольца, непосредственно прилегающего к стенкам большого отверстия и включающего в себя внутреннюю часть сечения *1* и все сечение *2*. Новому состоянию, в котором трансфлюксор окажется под действием установочного импульса, отвечает распределение магнитных потоков, показанное на рис. 7-14, *в*. При этом потоки Φ_2 и Φ_3 в плечах малого кольца направлены в противоположные стороны, что соответствует намагниченности малого кольца по часовой стрелке (рис. 7-14, *г*).

Пропустим переменный ток по обмотке запроса W_2. В тот полупериод, когда создаваемая этим током м. д. с. направлена в малом кольце против часовой стрелки (навстречу остаточному магнитному потоку), поток будет уменьшаться или даже будет происходить полное перемагничивание малого кольца; в следующий полупериод будет восстанавливаться прежнее состояние насыщения и т. д. Под воздействием изменений магнитного потока в обмотке W_3 будет индуктироваться э. д. с., и на выходе появится переменное напряжение — сигнал считывания «1».

Таким образом, физическая основа запоминания и неразрушающего считывания информации заключается в том, что в заблокированном трансфлюксоре (запись «0») магнитное состояние зоны вокруг малого отверстия не обеспечивает трансформаторной связи между обмотками W_2 и W_3, а в разблокированном трансфлюксоре (запись «1») между этими обмотками имеется достаточно сильная связь.

Изменяя амплитуду установочного импульса, можно регулировать радиус зоны перемагничивания вокруг большого отверстия и, следовательно, величину сечения перемычки *2*, в которой осуществляется реверсирование потока. Тем самым можно произвести регулируемую частичную разблокировку трансфлюксора, изменяя величину связи между обмотками W_2 и W_3. Это позволяет использовать трансфлюксор для запоминания аналоговой величины.

Более подробное качественное рассмотрение картины перераспределения потоков в процессе работы трансфлюксора на основе модели, предложенной Роу и Слемоном [7-37], содержится в [1-11].

Практически целесообразно использовать для считывания информации из трансфлюксора не переменный ток, а знакопеременные несимметричные импульсы: с относительно большой амплитудой, создающие поле по часовой стрелке (так называемые приводные импульсы), и с меньшей амплитудой, недостаточной для разблокировки трансфлюксора, действующие в противоположном направлении (подготавливающие импульсы).

В запертом трансфлюксоре приводные и, тем более, подготавливающие импульсы не могут заметно изменить потока в зоне вокруг малого отверстия и, следовательно не вызывают индукции э. д. с. в обмотке считывания. В открытом же трансфлюксоре достаточно мощные приводные импульсы обеспечивают форсированное перемагничивание этой зоны, что обусловливает индукцию в обмотке W_3 достаточно больших сигналов считывания.

Подготавливающие импульсы должны создавать напряженность поля, превышающую коэрцитивную силу, чтобы обеспечить реверсирование потока вокруг малого отверстия, но в то же время амплитуда их должна быть недостаточной для влияния на поток в сечении *1* трансфлюксора.

Трансфлюксор характеризуется двумя видами характеристик — установочными и приводными.

Установочные характеристики представляют зависимость так называемого выходного потока (т. е. того потока, который обменивается во время считывания между участками *2* и *3* магнитной цепи при действии возбуждающего поля на участок *3*) от м. д. с. отпирающего (установочного) импульса при постоянных величинах приводного поля (ампер-витков опросной обмотки W_2). Так как выходным потоком определяется величина выходного напряжения, то установочные характеристики, следовательно, представляют зависимость величины сигнала считывания от м. д. с. записи (установки) при постоянной м. д. с. опроса (привода).

На рис. 7-15, *а* изображено семейство установочных характеристик, снятых для экспериментального трансфлюксора при симметричном возбуждении его опросной (приводной) обмотки W_2 переменным током [7-34]. Характеристики сняты при различных значениях м. д. с. приводного поля $F_{пр}$, значения которой в ампер-витках надписаны на соответствующих кривых. М. д. с. блокировочного (запирающего) импульса в обмотке W_1, возвращающего сердечник в начальное состояние, была равна 5 *ав*. Из кривых видно, что условию получения максимальных напряжений при считывании соответствует относительно узкий диапазон м. д. с. установочного импульса. Это объясняется тем, что при слишком сильном установочном импульсе может произойти вместо отпирания трансфлюксора перемагничивание всех участков магнитопровода, т. е. новая блокировка трансфлюксора, но в противоположном направлении.

Другой вид характеристик трансфлюксора называется **приводными характеристиками**, которые представляют собой зависимость выходного потока, а значит, и напряжения

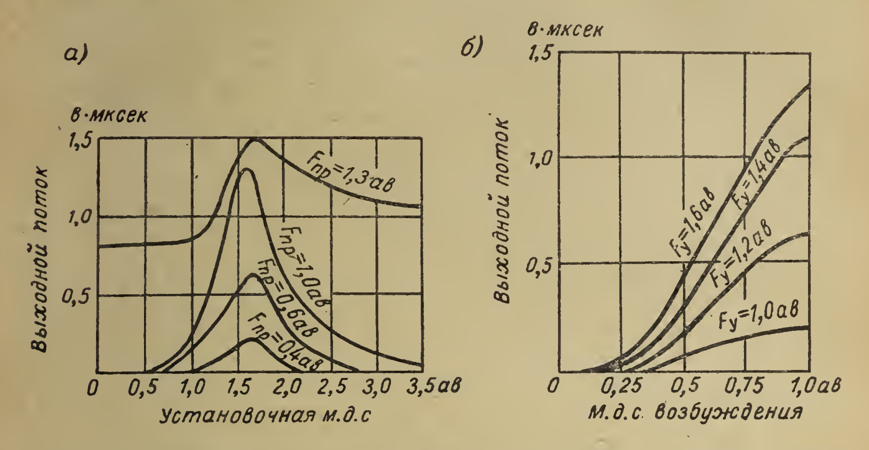


Рис. 7-15. Характеристики трансфлюксора, снятые при симметричном возбуждении переменным током: *а* — установочные; *б* — приводные.

считывания от величины приводного поля опросной обмотки при постоянных значениях поля отпирания (установки).

Семейство приводных характеристик рассматриваемого трансфлюксора при его симметричном возбуждении переменным током представлено на рис. 7-15, *б*. Кривые сняты при различных значениях м. д. с. поля установки F_y, которые надписаны на соответствующих кривых.

Приблизительно такой же характер, как кривые, изображенные на рис. 7-15, *а* и *б*, имеют и семейства установочных и приводных характеристик, снятых при несимметричном возбуждении опросной обмотки трансфлюксора знакопеременными импульсами.

Рис. 7-16. Схема разрядной матрицы трехмерного ЗУ на двухотверстных трансфлюксорах.

Как элемент, обладающий двумя устойчивыми состояниями, трансфлюксор может применяться в цифровой вычислительной технике в схемах совпадения, переключателях, регистрах, оперативных ЗУ и т. д.

На рис. 7-16, например, изображена схема трехмерного ЗУ на двухотверстных трансфлюксорах.

Наряду с уже упоминавшимся преимуществом неразрушающего считывания описанное ЗУ на трансфлюксорах обладает и еще одним весьма существенным преимуществом, заключающимся в том, что оно допускает одновременную и независимую запись и считывание информации в двух различных трансфлюксорах. Это обусловлено возможностью одновременного и независимого возбуждения двух различных пар адресных шин записи и считывания, не связанных между собой общими магнитопроводами в сердечниках.

Кроме рассмотренных выше двухотверстных трансфлюксоров, разработаны также трансфлюксоры с тремя, четырьмя, пятью и шестью отверстиями, которые могут работать как в качестве логических, так и запоминающих элементов [7-21].

Наряду с классическими конфигурациями трансфлюксоров с центральным отверстием большого диаметра и периферийными — малого диаметра, предложен и ряд других конфигураций многоотверстных запоминающих элементов: флюксоры, бифлаксы и др. [1-2].

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

8-1. Тонкие магнитные пленки и элементы теории их перемагничивания

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в разработке оперативных ЗУ на тороидальных ферритовых сердечниках, многоотверстных пластинах и других ферромагнитных элементах, этим элементам присущи такие существенные недостатки, как ограниченное быстродействие и технологические трудности, связанные с построением на них ЗУ очень большой емкости.

Полный цикл обращения к ЗУ на ферритовых элементах составляет в настоящее время 2—20 *мксек*, причем в модифицированных схемах ЗУ, например, на миниатюрных сердечниках, работающих по частному гистерезисному циклу, в схемах с использованием форсированного перемагничивания, и в некоторых других схемах время обращения удается снизить в лучшем случае до 0,3—1,0 *мксек*.

Объясняется это тем, что коэффициент перемагничивания относительно мало отличается у разных типов ферритов, так как процессы перемагничивания объемных ферритовых элементов происходят в основном за счет смещения границ доменов, обладающих определенной инерционностью, обусловленной магнитной вязкостью. Основным путем уменьшения времени перемагничивания при этом служит форсирование перемагничивающего поля,

что энергетически невыгодно и нецелесообразно в ЗУ большой емкости.

Значительно меньшей инерционностью характеризуется процесс перемагничивания за счет вращения вектора полной намагниченности под воздействием внешнего поля. Такой процесс происходит в тонких магнитных пленках, причем особенно легко при воздействии на них поля, ориентированного в плоскости пленки перпендикулярно направлению легкого перемагничивания. Это обстоятельство позволяет использовать тонкопленочные запоминающие элементы в ЗУ с более высоким (на один-два порядка) быстродействием, чем в обычных ЗУ на ферритовых элементах. Благодаря большому отношению поверхности пленочного элемента к его объему создаются хорошие условия естественного охлаждения. В то время как ферритовые сердечники на частотах более 1—2 *Мгц* нагреваются выше допустимой температуры, пленочные элементы могут работать на частотах 3—5 *Мгц* и более. Вихревые токи в пленках вследствие их малой толщины практически отсутствуют.

Температура Кюри пермаллоевой пленки равна 650—700° С, а рабочий диапазон температур составляет приблизительно от 100 до 200° С.

Важными преимуществами пленочных элементов являются также их малый объем и технологичность, позволяющая изготовлять запоминающие элементы, соединительные проводники, селектирующие шины и другие элементы схем в едином комплексном процессе, осуществляемом методами новейшей технологии массового производства микроминиатюрных блоков и схем.

Все изложенное объясняет значительный интерес, проявляемый в настоящее время к ЗУ на тонких магнитных пленках, которые уже сейчас находят широкое применение, а в будущем несомненно сыграют важнейшую роль при создании сверхбыстродействующих вычислительных машин.

Тонкими магнитными пленками называют пленки, толщина которых соизмерима с шириной стенки между доменами. Ширина стенки определяется соотношением энергии взаимодействия магнитных моментов соседних атомов и энергии анизотропии материала. Она пропорциональна величине — $\sqrt{A/K}$, где A — обменная энергия и K — постоянная анизотропии. Для пермаллоя, состоящего из 80% Ni и 20% Fe, ширина стенки равна примерно 2000—3000 Å. В вычислительной технике применяются пленки толщиной от 200 до 15 000 Å.

В тонкой пленке перпендикулярно ее плоскости может располагаться только один домен, и векторы самопроизвольной намагниченности при отсутствии внешних возмущений ориентируются в плоскости пленки в направлениях; обеспечивающих минимум полной энергии. Однако это не означает, что векторы намагниченности обязательно параллельны и направлены в одну сторону на всей площади пленочного элемента, т. е. что он всегда имеет

однодоменную структуру. Так, например, после размагничивания переменным полем пленка, как правило, состоит из нескольких доменов.

Если бы пленочный элемент всегда представлял собой только один домен, то изменение его магнитного состояния совершалось бы только вследствие вращения вектора намагниченности. Фактически же процесс перемагничивания пленки может происходить как за счет возникновения и роста доменов, т. е. смещения доменных стенок, так и за счет вращения векторов намагниченности.

Процессы перемагничивания в тонких пленках обусловливаются в основном вращением векторов намагниченности доменов. При этом может происходить как одновременное вращение векторов намагниченности всех доменов (когерентное вращение), так и более медленный процесс неодновременного вращения векторов (некогерентное вращение).

Перемагничивание пленки в результате когерентного вращения может осуществляться за время порядка нескольких наносекунд. Скорость же процесса переключения за счет смещения стенок доменов оказывается примерно на три-четыре порядка ме́ньшей, чем при когерентном вращении.

Поэтому естественно стремление создать такие условия изготовления и эксплуатации пленочных запоминающих элементов, при которых перемагничивание происходило бы только за счет вращения векторов намагниченности.

Наибольший теоретический интерес с точки зрения использования пленок в качестве элементов ЗУ представляет вопрос о магнитных процессах в идеальной однодоменной пленке при воздействии на нее внешних полей. Этот процесс можно описать, если найти зависимость энергии рассматриваемой системы от угла между магнитным моментом пленки и некоторым заданным направлением, в качестве которого удобно выбрать, например, направление легкого намагничивания.

Полная энергия системы E, отнесенная к единице объема, может быть выражена суммой нескольких составляющих:

$$E = E_{\text{вн}} + E_{\text{с}} + E_{\text{к}} + E_{\text{м}}, \tag{8-1}$$

где $E_{\text{вн}}$ — энергия магнитного момента во внешнем поле; $E_{\text{с}}$ — энергия магнитного момента в собственном поле; $E_{\text{к}}$ — энергия магнитной анизотропии; $E_{\text{м}}$ — магнитоупругая энергия.

Все составляющие энергии также отнесены к единице объема пленки. Пренебрегая в первом приближении, ввиду относительной малости, в выражении (8-1) членами $E_{\text{с}}$ и $E_{\text{м}}$, можно считать, что полная энергия системы

$$E = E_{\text{вн}} + E_{\text{к}}. \tag{8-2}$$

Устойчивые состояния равновесия магнитного момента будут, очевидно, соответствовать минимумам функции E, а неустойчивые — максимумам этой функции.

Рассмотрим магнитные состояния и процессы перемагничивания пленочного элемента с одноосевой анизотропией, имеющего круговую форму (рис. 8-1).

Пусть элемент расположен в плоскости X, Y, причем направление легкого намагничивания, соответствующее магнитному состоянию элемента, для которого энергия минимальна, совпадает с направлением оси X. Направление трудного намагничивания, соответствующее максимуму энергии, совпадает с направлением оси Y.

Пусть на пленку действует внешнее поле с напряженностью H, в результате чего вектор намагниченности I оказывается ориентированным под углом φ к направлению легкого намагничивания.

Если обозначить через θ угол между направлениями внешнего поля H и намагниченности I, то энергию во внешнем поле можно записать в виде:

$$E_{вн} = -HI\cos\theta. \qquad (8\text{-}3)$$

Однако для последующего анализа более удобно выразить эту энергию суммой энергий, обусловленных составляющими вектора H по осям X и Y, т. е.

$$E_{вн} = -\left[H_x I\cos\varphi + H_y I\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)\right],$$

или

$$E_{вн} = -H_x I\cos\varphi - H_y I\sin\varphi, \qquad (8\text{-}4)$$

где

$$H_x = H\cos(\varphi + \theta); \qquad H_y = H\sin(\varphi + \theta).$$

Рис. 8-1. Векторная диаграмма для пленочного элемента с одноосевой анизотропией.

Энергия одноосевой анизотропии $E_к$, т. е. энергия, необходимая для поворота вектора намагниченности на угол φ относительно направления легкого намагничивания, может быть аппроксимирована выражением:

$$E_к = K\sin^2\varphi, \qquad (8\text{-}5)$$

где K — постоянная анизотропии, представляющая собой энергию анизотропии, необходимую для поворота вектора намагниченности в единице объема ферромагнетика из направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания.

Таким образом, полную энергию системы E, выраженную уравнением (8-2), после подстановки в него (8-4) и (8-5) можно записать в виде:

$$E = K\sin^2\varphi - H_x I\cos\varphi - H_y I\sin\varphi. \qquad (8\text{-}6)$$

Из этого выражения легко определить состояния равновесия системы, соответствующие минимумам энергии E, как функции угла φ. Найдем для этого производную от E по φ и приравняем ее нулю:

$$\frac{dE}{d\varphi} = 2K\sin\varphi\cos\varphi + H_x I\sin\varphi - H_y I\cos\varphi = 0. \qquad (8\text{-}7)$$

В отсутствие внешнего поля, когда $H_x = H_y = 0$, множитель $\sin\varphi\cos\varphi$, входящий в первый член выражения производной, равен нулю при $\varphi = 0$, $\pi/2$, π и $3\pi/2$, что соответствует экстремумам функции $E = f(\varphi)$. При этом значения $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi$, соответствующие минимумам энергии, определяют устойчивое состояние равновесия системы, а значения $\varphi = \pi/2$ и $\varphi = 3\pi/2$, соответствующие максимумам энергии, определяют неустойчивые состояния равновесия. Все остальные состояния являются также неустойчивыми.

Рассмотрим теперь частный случай, когда приложенное внешнее поле направлено вдоль оси трудного намагничивания, т. е. $H_x = 0$. Такое поле в дальнейшем, для простоты, будем называть поперечным полем.

Подставляя в уравнение (8-7) $H_x = 0$, получим:

$$2K\sin\varphi\cos\varphi - H_y I\cos\varphi = 0,$$

откуда

$$H_y = \frac{2K}{I}\sin\varphi. \qquad (8\text{-}8)$$

Так как нами рассматривается пленка, обладающая одноосевой анизотропией, то, очевидно, уже при отсутствии внешнего поля ее намагниченность I имеет максимально возможную величину, а при воздействии внешнего поля может происходить лишь вращение вектора намагниченности без приращения его величины. Следовательно, отношение $2K/I$ есть также постоянная величина, которая имеет размерность напряженности магнитного поля.

Обозначим

$$\frac{2K}{I} = H_к = \text{const}. \qquad (8\text{-}9)$$

Составляющая намагниченности I по оси Y, очевидно,

$$I_y = I\sin\varphi.$$

Но, учитывая, что из (8-8) и (8-9)

$$\sin\varphi = \frac{H_y}{H_к},$$

можно написать уравнение

$$I_y = \frac{I}{H_к}H_y. \qquad (8\text{-}10)$$

Так как здесь множитель $I/H_к = \text{const}$, то оказывается, что имеет место линейная зависимость $I_y = f(H_y)$, ограниченная предельными значениями $I_{y\,мин} = -I$ и $I_{y\,макс} = +I$, соответствующими значениям $H_y = -H_к$ и $H_y = +H_к$ (рис. 8-2, *а*). Экспериментальная кривая зависимости $I_y = f(H_y)$, приведенная на том же рисунке, представляет собой весьма узкую петлю гистерезиса, близкую к теоретической прямолинейной зависимости. Это незначительное отличие эксперимента от теории обусловлено

наличием некоторых, хотя и весьма малых, потерь при перемагничивании, не учтенных при теоретическом рассмотрении вопроса.

Рассмотрим теперь другой частный случай действия одного лишь продольного внешнего поля, т. е. поля, направленного вдоль оси легкого намагничивания. В этом случае поперечная составляющая поля отсутствует ($H_y = 0$). Произведя соответствующие преобразования уравнения (8-6) (при этом приходится приравнивать нулю не только первую производную $dE/d\varphi$, но и вторую производную $d^2E/d\varphi^2$), находим, что необратимое изменение намагниченности на величину $2I$ происходит при значениях $H_x = H_к$ и $H_x = -H_к$. Этому соответствует идеально прямоугольная петля гистерезиса *1*, показанная на рис. 8-2, *б*. Экспериментальная кривая зависимости $I_x = f(H_x)$, приведенная на том же рисунке, оказывается весьма близкой к теоретической.

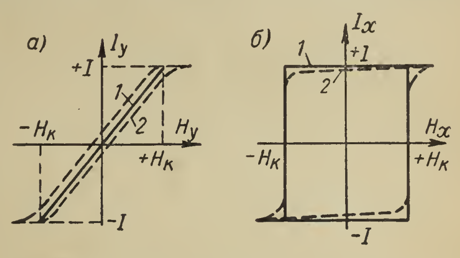


Рис. 8-2. Зависимость поперечной и продольной составляющей намагниченности от соответствующих напряженностей внешнего поля: *а* — график функции $I_y = f(H_y)$ при $H_x = 0$:
1 — теоретический; *2* — экспериментальный;
б — график функции $I_x = f(H_x)$ при $H_y = 0$:
1 — теоретический; *2* — экспериментальный.

Таким образом, величина $H_к$ физически представляет собой некоторую напряженность поля, соответствующую коэрцитивной силе при воздействии в направлении легкого намагничивания и порогу насыщения при воздействии в направлении трудного намагничивания.

Для дальнейшего анализа процессов удобно пользоваться вместо абсолютных значений составляющих напряженности H_x и H_y безразмерными переменными:

$$\left.\begin{aligned} h_x &= \frac{H_x}{H_к}; \\ h_y &= \frac{H_y}{H_к}. \end{aligned}\right\} \qquad (8\text{-}11)$$

Характеристики, построенные как функции таких безразмерных переменных, называют о б о б щ е н н ы м и х а р а к т е р и с т и к а м и. Можно показать теоретически и проверить экспериментально, что при одновременном воздействии продольного и поперечного полей обобщенная петля гистерезиса для перемагничивания в направлении легкого намагничивания изменяет свою форму от прямоугольной (при $h_y = 0$) до безгистерезисной S-образной формы (при $h_y = 1$). Эти петли, приведенные на рис. 8-3, иллюстрируют очень важный факт, заключающийся в том, что поперечное поле изменяет коэрцитивную силу в направлении оси легкого намагничивания. Физически это объясняется тем, что

поперечное поле является как бы источником энергии, необходимой для преодоления энергии анизотропии.

В соответствии с описанной простейшей моделью перемагничивания пленки внешнему полю достаточно довести вектор намагниченности до вершины потенциального барьера, т. е. повернуть его на угол $\varphi = 90°$ к направлению легкого намагничивания, после чего дальнейшее вращение вектора намагниченности, связанное с уменьшением потенциальной энергии, будет развиваться лавинообразно, не требуя затрат внешней энергии, пока не будет достигнуто новое состояние, соответствующее минимуму потен-

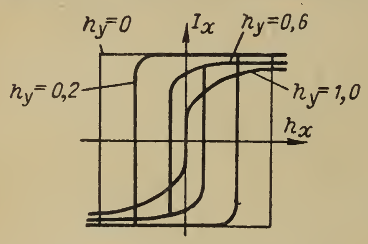


Рис. 8-3. Обобщенные теоретические петли гистерезиса тонкой пленки $I_x = f\ (h_x)$ для поля, приложенного в направлении легкого намагничивания, при различных значениях поперечного поля h_y.

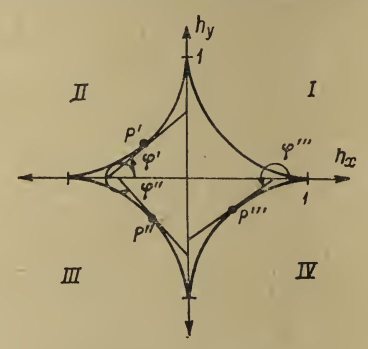


Рис. 8-4. Геометрическое место критических точек (астроида).

циальной энергии, т. е. намагниченности в направлении, противоположном первоначальному направлению легкого намагничивания.

Если осуществить для анализа устойчивости магнитных состояний пленочного элемента [8-9] некоторые дальнейшие преобразования уравнения (8-7) с учетом обозначений (8-11), то можно получить уравнение кривой (астроиды), которая является геометрическим местом критических точек (рис. 8-4):

$$h_x^{\frac{2}{3}} + h_y^{\frac{2}{3}} = 1. \qquad (8\text{-}12)$$

Дальнейший анализ показывает, что, если провести касательные к этой астроиде, то устойчивым состояниям пленочного элемента будут соответствовать те точки, которые лежат на частях касательных, расположенных от точек касания P', P'', ... в направлении к оси ординат.

Ветви астроиды, расположенные в первом квадранте, соответствуют равновесным значениям углов φ от 180 до 90°, во втором — от 90 до 0°, в третьем — от 270 до 360° и в четвертом — от 180 до 270°. Таким образом, для нахождения равновесных положений векторов намагниченности (углов φ) при заданных значениях h_x и h_y нужно из точки с координатами (h_x, h_y) провести касательные к астроиде [8-40].

Все сказанное выше о теории перемагничивания пленочных элементов относилось к процессу вращения вектора намагниченности в идеальной однодоменной пленке. Однако в реальном пленочном элементе перемагничивание происходит за счет трех накладывающихся друг на друга процессов, удельный вес которых зависит от параметров пленки и интенсивности внешних полей. Эти процессы следующие: 1) движение стенок доменов; 2) некогерентное вращение; 3) когерентное вращение.

Характером процесса определяется скорость переключения элемента. На рис. 8-5 представлены графики зависимостей

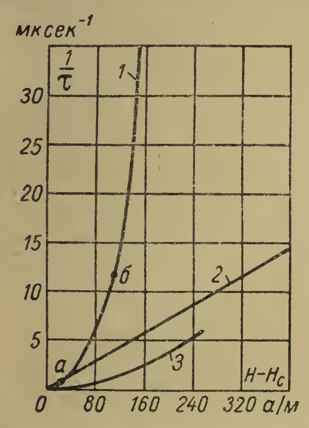


Рис. 8-5. Характеристики перемагничивания магнитных материалов $1/\tau = f(H - H_c)$.

1 — пермаллоевая магнитная пленка состава: 80% Ni и 20% Fe ($H_к = 200$ *а/м*, $H_y = 48$ *а/м*); *2* — лента из молибденового пермаллоя толщиной 3,2 *мкм*; *3* — феррит марки *S*-1.

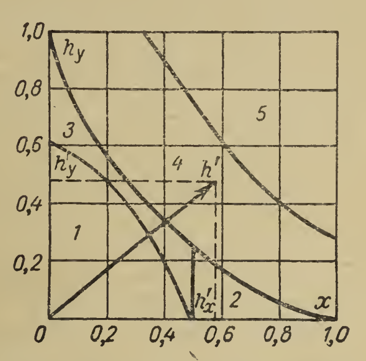


Рис. 8-6. Диаграмма областей механизмов перемагничивания.

1 — перемагничивания не происходит; *2* — область смещения стенок доменов; *3* — область «сползания»; *4* — область некогерентного вращения; *5* — область когерентного вращения.

$1/\tau = f(H - H_c)$, где τ — время переключения; $(H - H_c)$ — превышение напряженности перемагничивающего поля над коэрцитивной силой материала. Кроме характеристики перемагничивания пермаллоевой пленки, на рисунке для сравнения приведены также характеристики для пермаллоевой ленты и феррита *S*-1.

При относительно медленном перемагничивании в слабых полях основным процессом является движение доменных стенок (участок 0*а* кривой *1*). При увеличении напряженности поля начинается процесс некогерентного вращения. Порог некогерентного вращения *а* может быть определен экспериментально, как величина результирующей напряженности поля H, полученного при суммировании поперечного (H_y) и продольного (H_x) полей, соответствующая месту резкого изменения крутизны характеристики $1/\tau = f(H - H_c)$.

Когда суммарное поле H значительно превышает пороговую величину (точка *а* на кривой) и при условии очень малой длительности фронтов перемагничивающих импульсов, на характеристике *1* появляется второй перегиб (точка *б*), соответствующий началу процессов когерентного вращения. Крутизна характеристики $1/\tau = f(H - H_c)$ еще возрастает, и в полях с напряженностью в несколько сотен ампер на метр при достаточно крутых фронтах импульсов наблюдалось переключение за время порядка нескольких наносекунд, т. е. примерно на один-два порядка быстрее, чем у ленточных или ферритовых сердечников.

Так как механизм и скорость переключения пленки зависят от результирующего магнитного поля, в общем случае произвольно ориентированного относительно направления легкого намагничивания, то для определения механизма переключения удобно пользоваться диаграммой областей механизмов перемагничивания, представленной на рис. 8-6. Здесь по осям координат отложены относительные значения продольной (h_x) и поперечной (h_y) составляющих напряженности внешнего поля, а соответствующими кривыми плоскость разделена на области, для которых характерны те или иные основные механизмы перемагничивания.

При пользовании этой обобщенной диаграммой для определения основного механизма перемагничивания данного пленочного элемента в конкретных условиях воздействия на него поля с составляющими напряженности — продольной H'_x и поперечной H'_y — нужно определить соответствующие относительные значения этих напряженностей $h'_x = H'_x/H_к$ и $h'_y = H'_y/H_к$, отложить их по осям координат и построить результирующий вектор относительной напряженности h'. Местонахождение конца этого вектора в той или иной области диаграммы и позволяет судить о механизме перемагничивания элемента в заданных условиях.

Область *1* характеризуется отсутствием необратимых процессов перемагничивания: после прекращения действия внешнего поля элемент возвращается в свое начальное магнитное состояние. В области *2* протекает медленный процесс переключения за счет движения стенок доменов. Область *3* соответствует процессам так называемого «сползания», т. е. медленного вращения, которое может обеспечить переключение элемента лишь при повторном воздействии полей. Области *4* и *5*, соответственно, характеризуются процессами некогерентного и когерентного вращения векторов намагниченности.

При пользовании диаграммой следует помнить о том, что границы между областями относительны и не являются в действительности четкими, а представляют довольно размытые области, при переходе через которые происходит постепенная смена одного преимущественного механизма перемагничивания другим. Далее, кроме абсолютной величины напряженности импульсов поля, на возникновение того или иного доминирующего механизма пере-

магничивания влияет форма импульсов (крутизна их фронтов), температура и другие внешние условия. Наконец, характеристики и, значит, границы областей перемагничивания пленочных элементов при современном состоянии технологии могут существенно изменяться от партии к партии и от образца к образцу, в пределах одной партии.

Некоторые вопросы теории пленочных элементов, рассмотренные выше, касались описания состояний и процессов перемагничивания в относительно медленных полях, т. е. в квазистатическом режиме. Значительно сложнее математическое описание процессов перемагничивания магнитных элементов и, в частности, пленок в динамическом режиме.

8-2. Плоские пленочные запоминающие элементы

Максимальная толщина слоев металла, получаемых путем прокатки, может составлять около 1 *мк*. Поэтому для изготовления тонких ферромагнитных пленок толщиной порядка сотен или тысяч ангстрем пользуются иными методами, из которых наиболее широкое практическое применение получили метод осаждения паров металла в вакууме и метод электролитического осаждения (гальваностегии).

Процесс осаждения паров металла на подложку осуществляется в вакуумной камере, в которой поддерживается разрежение порядка 10^{-5}—10^{-6} *мм рт. ст.*

Для обеспечения в пленочных элементах начальной магнитной ориентации в заданном направлении в месте расположения подложки создается сильное магнитное поле с напряженностью порядка $4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^4$ *а/м*. Чтобы снять внутреннее напряжение в пленке и улучшить сцепление со стеклянной подложкой, последняя подогревается до 300—400° С. Осаждение пленки на подложку осуществляется через маску с отверстиями.

Для уменьшения площади витка считывания пленка может наноситься на металлическую подложку, которая служит обратным проводником витка. Это уменьшает полное сопротивление контура считывания и ослабляет его индуктивную связь с контуром записи.

При изготовлении матриц ЗУ на подложку с пятнами магнитной пленки укладываются числовые и разрядные шины. Нанесение шин может осуществляться через маски таким же методом, как и напыление магнитных пленок. При этом группы шин разделяются изоляционными слоями, создаваемыми, например, распылением моноокиси кремния.

Другой метод сборки накопителя заключается в том, что подложки с магнитными пленками обертываются полосами из фольгированного лавсана, на котором способом фототравления созданы проводящие шины.

Наряду с методами распыления и испарения в вакууме применяется также способ осаждения пленки на проводящую подложку.

Некоторые конструктивные варианты плоских пленок приведены на рис. 8-7. Пленка может быть нанесена на подложку через маску с прорезями, в результате чего получается плата ЗУ в виде подложки, на которой расположены ряды отдельных элементов (пятен) той или иной конфигурации (рис. 8-7, *а* и *б*). Эти элементы имеют круглую, квадратную или прямоугольную форму.

Возможно также применение в качестве плат ЗУ сплошных пленок (рис. 8-7, *в*). В этом случае отдельные элементы представляют собой просто зоны, размеры которых определяются создаваемой возбуждающими шинами напряженностью магнитного поля.

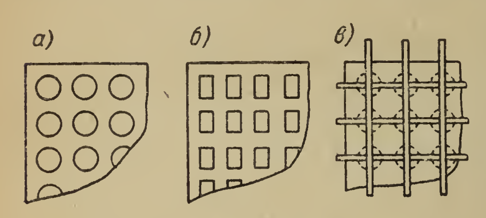


Рис. 8-7. Конструктивные варианты плоских магнитных пленок: *а* — элементы в виде отдельных круглых пятен; *б* — элементы в виде отдельных прямоугольных пятен; *в* — сплошная пленка.

Очевидна аналогия между платами ЗУ на отдельных сердечниках и на отдельных пленочных элементах, с одной стороны, и между сплошными многоотверстными ферритовыми пластинами и сплошными пленками — с другой.

Рассмотрим некоторые соображения, позволяющие подойти к выбору и расчету конфигурации пленочных запоминающих элементов и их взаимного расположения на подложках.

Размещение пленочных запоминающих элементов в непосредственной близости один от другого может явиться причиной существенной связи между ними, гораздо бóльшей, чем в ЗУ на сердечниках или многоотверстных пластинах. Объясняется это тем, что плоские пленки представляют собой незамкнутые магнитопроводы, магнитные потоки которых значительную часть своего пути проходят через воздух, тогда как в ферритовых элементах потоки практически полностью замыкаются внутри ферритового материала.

При прочих равных условиях магнитная связь между запоминающими элементами более сильно выражена в случае применения сплошных пленок. У элементов, выполненных в виде отдельных пятен, взаимное влияние проявляется слабее, ибо они отделены друг от друга воздушными промежутками. Поэтому применение пленок в виде отдельных пятен позволяет строить ЗУ с бóльшей плотностью записи. С другой стороны, недостатком плат с отдельными пятнами являются более высокие требования к точности расположения шин, так как от этого в значительно бóльшей степени зависит идентичность параметров сигналов, чем при применении сплошных пленок.

При считывании информации с одного из запоминающих элементов поле опроса действует не только на избранный элемент, но и на соседние. Таким образом, отдельные элементы оказываются связанными между собой и через поле опроса, причем эта связь не зависит от того, представляют ли собой элементы отдельные пятна или участки сплошной пленки.

При выборе конструкции платы пленочного ЗУ важную роль играет вопрос о форме пятна, от решения которого во многом зависят: амплитуда считываемого сигнала, энергия, необходимая для перемагничивания элемента, и возможная плотность размещения элементов.

В конкретных технологических условиях магнитные пленки, нанесенные на одну и ту же подложку, имеют не вполне совпадающие направления осей легкого намагничивания. Если принять, как это имеет место в большинстве ЗУ, что ось легкого намагничивания совпадает по направлению с числовой шиной, то неоднородность пленок можно количественно характеризовать так называемым *перекосом* — углом отклонения оси легкого намагничивания от направления числовой шины.

Величина перекоса и ее разброс серьезно сказываются на устойчивости работы пленочных ЗУ, и поэтому минимизация перекоса является весьма важной задачей. Теоретические и экспериментальные соображения приводят к выводу, что с этой точки зрения наиболее благоприятной формой плоского пленочного элемента является прямоугольная с длинной осью, совпадающей с осью легкого намагничивания. Так, в работе [8-52] приводятся для конкретной пермаллоевой пленки данные о величине перекоса, которая составила для круглых элементов диаметром 1,15 *мм* $+3° \div -13°$, для прямоугольных элементов с размерами $2{,}03 \times 0{,}76$ *мм* $+3° \div 0°$ и с размерами $2{,}03 \times 0{,}51$ *мм* $-2° \div 0°$.

При данной форме пленочного элемента амплитуда сигнала возрастает с увеличением толщины пленки. Однако при этом возрастает и размагничивающий фактор, что требует увеличения мощности импульсов тока в числовой шине. В то же время увеличение толщины пленки приводит к снижению коэрцитивной силы [8-11], и, следовательно, к уменьшению разрядного тока.

Очень важным вопросом проектирования матрицы пленочного ЗУ является выбор размеров магнитных пятен и оптимальных расстояний числовых (адресных) шин друг от друга и, соответственно, разрядных шин друг от друга. Эти вопросы геометрии платы должны решаться так, чтобы результирующее магнитное поле, создаваемое в определенных участках платы в результате совместного действия токов в возбужденных шинах и взаимного влияния намагниченных пленочных элементов, было достаточным для перемагничивания избранных элементов и в то же время не разрушало информацию в соседних запоминающих элементах [1-11, 8-52]. С другой стороны, взаимное расположение элементов

и шин должно обеспечивать достаточно большое отношение сигнал/помеха при считывании информации.

Для оценки величины сигнала считывания поперечным полем с тонкопленочного элемента можно воспользоваться следующими рассуждениями [1-9].

При нарастании напряженности поля считывания по экспоненциальному закону

$$H_{сч} = H_m \left(1 - e^{-\frac{2,3}{\tau_ф} t}\right), \tag{8-13}$$

где H_m — амплитуда поля считывания (полагаем, что $H_m > H_к$); $\tau_ф$ — длительность фронта импульса тока считывания, замеренная на уровне 0,9 его амплитуды.

При этом длительность импульса напряжения считывания

$$\tau_{сч} = \frac{\tau_ф}{2,3} \ln\left(1 - \frac{H_к}{H_m}\right). \tag{8-14}$$

При грубой оценке амплитуду сигнала считывания можно принять равной отношению приращения магнитного потока к длительности импульса считывания $\tau_{сч}$:

$$E = A \frac{\Delta B}{\tau_{сч}}, \tag{8-15}$$

где A — сечение пленки в направлении, перпендикулярном направлению магнитного потока.

При повороте вектора намагниченности на 90° поток, охватываемый витком считывания, изменяется от 0 до Φ_m. Следовательно,

$$E = \frac{AB_m}{\tau_{сч}}. \tag{8-16}$$

Подставляя сюда $\tau_{сч}$ из (8-14), получим

$$E = \frac{2,3\, AB_m}{\tau_ф \ln\left(1 - \frac{H_к}{H_m}\right)}. \tag{8-17}$$

Если предположить, что импульс тока считывания имеет линейно нарастающий фронт, то выражение (8-17) можно записать в виде:

$$E = \frac{AB_m H_m}{\tau_ф H_к}. \tag{8-18}$$

Значения длительности импульсов считывания $\tau_{сч}$ для различных значений $H_m/H_к$ и $\tau_ф$ приведены в табл. 8-1, [1-9].

Результаты экспериментального исследования скорости перемагничивания пермаллоевых плоских пленочных элементов толщиной 1400 Å в зависимости от напряженности продольного поля H_x при фиксированных значениях поперечного поля H_y представлены на рис. 8-8 в виде семейства кривых $^1/_\tau = f\,(H_y)$ [8-7]. Из

Длительность фронта $\tau_ф$, *нсек*	Длительность импульса считывания $\tau_{сч}$ для $H_m/H_к$, *нсек*				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
30	23	16	12	10	9
40	31	21	17	14	12
50	38	27	21	17	15
60	46	32	25	21	18
70	54	38	29	24	21

приведенных графиков видно, что увеличение поперечного поля обусловливает значительное ускорение процессов перемагничивания пленки, что выражается как в снижении порогового поля, так и в уменьшении величины коэффициента переключения $S_ш$. Так, для рассматриваемого случая вычисленные значения коэффициентов переключения в порядке возрастания интенсивности поперечного поля следующие: $S_{ш1} = 0{,}148$ *мкк/см*; $S_{ш2} = 0{,}146$ *мкк/см*; $S_{ш3} = 0{,}120$ *мкк/см*; $S_{ш4} = 0{,}104$ *мкк/см* и $S_{ш5} = 0{,}096$ *мкк/см*.

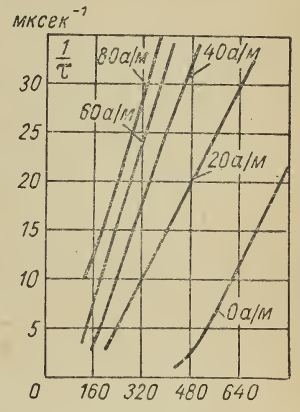


Рис. 8-8. Графики зависимости $1/\tau = f(H_x)$ при $H_y = \text{const}$ (соответствующие значения H_y надписаны на кривых).

В результате измерений на установке, специально созданной для наблюдения очень быстрых процессов перемагничивания [8-5], для образцов пермаллоевых пленок состава 80% Ni 20% Fe и толщиной 1100—2500 Å при $H_к = 240$ *а/м* в продольных полях 240—720 *а/м* при одновременном воздействии поперечного поля 40—120 *а/м* были получены времена перемагничивания за счет когерентного вращения порядка 1,5—3 *нсек*.

Существенно различаются параметры пленочных элементов, наносимых на изоляционные и металлические подложки. В последнем случае можно добиться значительного уменьшения уровня помех и увеличения плотности расположения запоминающих элементов. Применение металлических подложек повышает также механическую прочность плат ЗУ и их устойчивость в отношении статических и динамических нагрузок.

Наконец, при использовании металлической подложки в качестве обратного провода уменьшается общая длина и количество управляющих шин и значительно снижается их индуктивность. Последнее обстоятельство объясняется действием вихревых токов в подложке, которые как бы вытесняют магнитный поток из подложки и концентрируют его в узком пространстве между управля-

ющей шиной и подложкой. Поле вихревых токов может быть заменено полем некоторого фиктивного проводника, представляющего собой как бы зеркальное отображение реального проводника, расположенное симметрично относительно проводящей поверхности и несущего ток, противоположный по направлению току в реальном проводнике. Таким образом, сечение витка, а значит и его индуктивность, оказывается меньше, чем в случае изоляционной подложки, когда сечение витка определяется расстоянием между прямым и обратным проводами, т. е., в конечном счете, толщиной подложки. Теоретические вопросы влияния вихревых токов в металлической подложке подробно рассмотрены в работе [1-9].

Недостатки металлических подложек заключаются в увеличении динамического размагничивающего поля и в наличии так называемого эффекта хранения магнитного потока пленочного элемента в подложке [1-2]. Последнее явление, которое трактуется также как явление растекания токов по основанию [8-12, 8-44], приводит к тому, что при частых обращениях к пленочному запоминающему элементу требуется меньший, а при редких обращениях — больший ток записи.

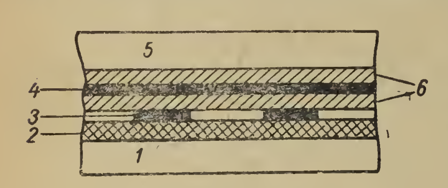


Рис. 8-9. Сечение магнитной пленочной платы с металлической подложкой и кипером.

1 — подложка; *2* — магнитная пленка; *3* — разрядные шины; *4* — числовая шина; *5* — кипер; *6* — изоляционные слои.

Действенным средством борьбы с растеканием токов в подложке и возникновением паразитных магнитных полей является применение замыкающего магнитопровода (кипера, магнитного поглотителя) [8-12, 8-26, 8-44, 8-45, 8-48]. При этом запоминающая плата состоит из семи слоев, как показано на рис. 8-9. Кипер выполняется в виде относительно толстого слоя магнитного материала с высокой проницаемостью и хорошими частотными свойствами. Например, в [8-12] описан кипер в виде пермаллоевой пленки толщиной 15000—20000 Å и показано, что его применение в 5—10 раз уменьшает размагничивающее поле запоминающих элементов с незамкнутым магнитопроводом и примерно во столько же раз ослабляет паразитные поля, действующие на запоминающий элемент от соседних шин. Некоторые вопросы построения магнитных плоских пленочных элементов с замкнутыми магнитопроводами рассмотрены подробнее в работе [8-6].

Одной из важных задач совершенствования пленочных запоминающих элементов является дальнейшее уменьшение их размеров и потребления мощности.

Однако уменьшение размеров пятна требует одновременного уменьшения и толщины пленки, во избежание увеличения размагничивающего фактора N, который для пленки пропорционален

ее толщине d и обратно пропорционален длине l пятна в направлении оси легкого намагничивания:

$$N \equiv \frac{d}{l}. \qquad (8\text{-}19)$$

Но уменьшение толщины пленки приводит к снижению величины выходного сигнала, что затрудняет усиление и выделение сигнала из помех.

Например, при использовании круглых пленочных пятен с диаметром 125 *мкм* и толщиной 200 Å, требующих ток записи 10 *ма* и ток опроса 25—35 *ма*, сигнал считывания имеет величину лишь около 0,1 *мв* [8-32], что естественно усложняет задачу проектирования схем усилителя считывания и выделения сигнала из помех. При уменьшении толщины пленки возрастают также технологические трудности получения пленочных пятен с идентичными параметрами.

Ряд исследований и разработок пленочных элементов имеет целью осуществление неразрушающего считывания информации.

В принципе неразрушающее считывание легко достигается в обычном пленочном элементе с одноосной анизотропией небольшим опросным полем, направленным по оси трудного намагничивания. В идеальном случае после поворота вектора намагниченности на угол, сколь угодно близкий к 90°, после прекращения действия внешнего поля вектор намагниченности должен возвратиться в свое начальное состояние. Однако в реальной пленке вследствие дисперсии направлений легкой оси и величины поля анизотропии этот критический угол, после поворота на который происходит возврат вектора намагниченности в исходное состояние, не превышает 15° [8-40].

Однако, если для неразрушающего считывания использовать столь малый поворот вектора намагниченности, то изменение составляющей поля вдоль легкой оси оказывается весьма малым и, следовательно, до ничтожной, плохо различимой, величины снижается и без того малый сигнал считывания.

Поэтому предложены некоторые конструкции пленочных элементов, специально предназначенных для реализации неразрушающего считывания.

Один из них —б и к о р — двухслойный запоминающий элемент, состоящий из двух пленок, с различными магнитными характеристиками, расположенных одна над другой [8-41, 8-50]. При этом запоминание осуществляется на одной пленке с высокой коэрцитивной силой, а считывание остаточного состояния запоминающей пленки производится с другой пленки, которая имеет малую коэрцитивную силу.

Кроме двухслойных структур пленочных запоминающих элементов, предложены четырехслойные элементы, состоящие из четырех однодоменных пленок, имеющих одинаковое поперечное

сечение, но различную длину в направлении вектора намагниченности [8-24].

Эти элементы обеспечивают осуществление надежного неразрушающего считывания, но из-за технологических трудностей их массового изготовления не получили распространения.

8-3. Запоминающие устройства на плоских магнитных пленках

При конструировании ЗУ на тонких магнитных пленках повсеместное распространение получили двухмерные схемы (схемы со словарной организацией). Основными причинами отказа от принципа выбора элемента по совпадению токов в пленочных ЗУ являются следующие соображения.

Во-первых, в отличие от трехмерных ЗУ на ферритовых сердечниках, при наиболее эффективном методе считывания за счет поворота вектора намагниченности в направлении оси трудного намагничивания считывающее поле любой величины будет вызывать индукцию э. д. с. помех в полуизбранных элементах. Во-вторых, для реализации потенциальных возможностей быстродействия считывание информации желательно производить возможно бóльшими полями, обеспечивающими перемагничивание элементов за счет вращения векторов намагниченности. В-третьих, недостаточная идентичность пленочных запоминающих элементов препятствует использованию их в схемах трехмерных ЗУ.

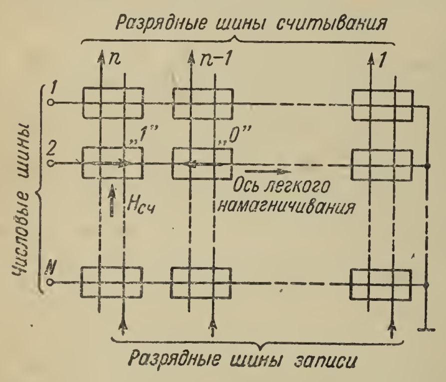


Рис. 8-10. Матрица двухмерного ЗУ на плоских магнитных пленках.

Схематическое изображение матрицы двухмерного ЗУ емкостью N n-разрядных чисел на плоских магнитных пленках приведено на рис. 8-10. В рассматриваемом ЗУ запоминающие элементы расположены так, что их оси легкого намагничивания совпадают с числовой шиной и, таким образом, поле опроса, создаваемое током, протекающим по этой шине, направлено вдоль оси трудного намагничивания.

На рис. 8-11 приведены временны́е диаграммы, иллюстрирующие процессы считывания и записи информации в таком запоминающем элементе. На том же рисунке схематически показаны и соответствующие состояния элемента в различные моменты времени. При этом все сплошные линии (кроме графика $i_ч$) относятся к считыванию и записи «1», а все штриховые — к считыванию и записи «0».

До момента t_1 появления импульса тока $i_ч$ в числовой шине пленочные элементы находятся в статическом состоянии и хранят соответственно «1» или «0». Под влиянием тока $i_ч$ происходит поворот вектора намагниченности на 90° к направлению трудной оси и в шине считывания возникает э. д. с. $e_{сч}$ того или иного знака, являющаяся полезным сигналом считывания. Максимального значения $e_{сч}$ может достигнуть в момент t_3, как показано на диаграмме, но это может произойти и раньше — во время нарастания импульса $i_ч$. Все зависит от свойств элемента, амплитуды $i_ч$, вре-

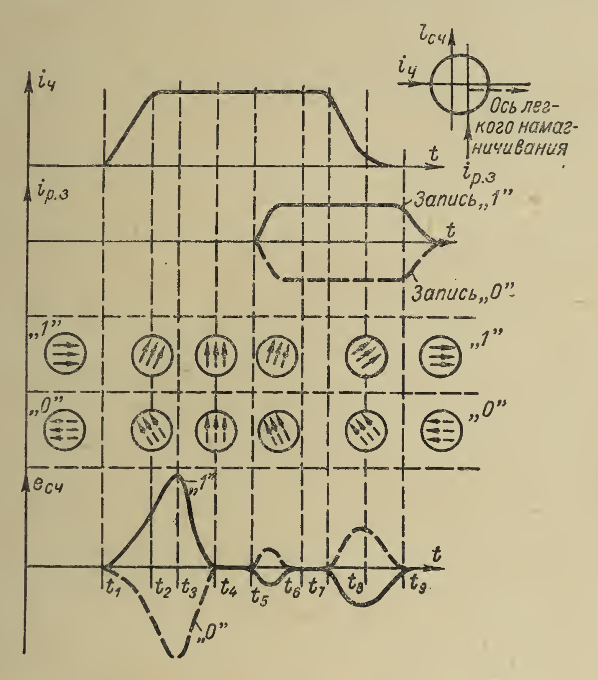


Рис. 8-11. Временны́е диаграммы записи и считывания.

мени нарастания его переднего фронта. Далее состояние пленочного элемента не изменяется до подачи в момент t_5 в разрядный провод записи импульса записи $i_{р.з}$ того или иного знака, соответствующего записи «1» или «0». При этом вектор намагниченности несколько поворачивается в ту или другую сторону в направлении оси легкого намагничивания, что приводит к появлению в шине считывания в промежуток времени от t_5 до t_6 импульса помехи от записи. Окончательный поворот вектора в прежнее или новое статическое состояние хранения информации происходит под влиянием импульса записи в течение длительности заднего фронта $i_ч$ и после окончания $i_ч$, причем в промежуток времени от t_7 до t_9, возникает повторный импульс помехи от записи.

Описанный способ работы ЗУ характеризуется применением разнополярных импульсов записи.

Относительно широкое применение получил также способ с постоянным полем смещения, при котором запись осуществляется однополярными токами. Если создать небольшое постоянное поле смещения $H_{см}$, действующее, например, в положительном направлении оси легкого намагничивания (рис. 8-10), т. е. в направлении, соответствующем записи единицы, то после считывания в какой-либо ячейке информации во всех элементах этой ячейки поле смещения будет стремиться записать «1». Для того же, чтобы в нужных разрядах записать «0», в соответствующие разрядные провода записи нужно подать импульс тока, создающий поле H_0, направленное навстречу $H_{см}$, причем должно выполняться условие $|H_c| > |H_0| > |H_{см}|$.

Эффект, близкий к воздействию постоянного поля смещения, может быть достигнут также расположением запоминающих пленочных элементов так, что их оси легкого намагничивания образуют некоторый угол с направлением числовой шины (угловое смещение).

Сравнение этих трех способов работы ЗУ с точки зрения их устойчивости [1-9] позволяет сделать вывод о том, что при одних и тех же пределах изменений управляющих токов наибольший разброс направлений легкого намагничивания может быть допущен в случае разнополярной записи, меньший разброс — при применении постоянного смещения и еще меньший — при угловом смещении. Положительным свойством двухполярной записи является также возможность индивидуальной регулировки токов записи отдельных разрядов ЗУ в зависимости от параметров пленочных пятен [1-2]. Однако при записи однополярными импульсами упрощается задача конструирования разрядных формирователей.

Наибольшее применение в настоящее время нашли ЗУ с разнополярной записью, хотя наряду с ними применяются и схемы с постоянным смещением.

В заключение приведем некоторые сведения о разработанных за последние годы ЗУ на плоских магнитных пленках.

В Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР разработаны матрицы типа МПМ-7, на которых построено ЗУ с записью разнополярными импульсами емкостью 64 56-разрядных чисел и временем полного цикла около 600 *нсек* [8-4]. Запоминающие элементы матриц МПМ-7 представляют собой прямоугольные пермаллоевые пятна размером $1{,}4 \times 2{,}4$ *мм* и толщиной 1200 Å, расположенные на подложке из алюминиевого сплава Д16-Т. Токи в числовых шинах не превышают 400 *ма*, ток записи — порядка 200 *ма*.

Сигналы считывания «1» и «0» — разнополярные, не менее 1,5 *мв*.

Отметим также несколько наиболее интересных зарубежных разработок.

Фирмой «Бюроуз» (США) разработано ЗУ емкостью 16384 чисел с временем цикла 0,5 *мксек*, состоящее из двух модулей по 8192 52-разрядных чисел [8-22]. Запоминающие элементы имеют размеры 2 × 0,76 *мм* при толщине пленки 1000 Å. На стеклянной подложке 70 × 43 *мм* размещается 32 × 24 = 768 пленочных пятен. Ток опроса в числовой шине около 400 *ма*; запись осуществляется разнополярными токами в 100 *ма*.

Фирма «IBM» (США) разработала ЗУ емкостью 8192 72-разрядных чисел с циклом 120 *нсек* [8-20] на пленочных элементах с размерами 0,76 × 0,635 *мм* и толщиной 800 A°. На медной подложке площадью 19,4 *см*² размещено 4128 таких элементов.

Одним из самых быстродействующих ЗУ на тонких пленках является разработанное также фирмой «IBM» (США) ЗУ емкостью 32 36-разрядных слов с циклом 60 *нсек* [8-17]. Носителем информации здесь является сплошная пермаллоевая пленка толщиной 600 Å, напыленная на подложку из медного сплава с размерами 76,2 × 76,2 *мм*². Ток опроса в числовой шине этого ЗУ равен 500 *ма*, разнополярные разрядные токи — 100 *ма*.

8-4. Цилиндрические пленочные запоминающие элементы

Несмотря на значительные успехи, достигнутые за последние годы в области создания ЗУ на плоских тонкопленочных магнитных элементах, им свойственны следующие недостатки. Простейшие конструкции с однослойной магнитной пленкой и незамкнутым магнитопроводом требуют применения значительных токов возбуждения и вследствие взаимного влияния не допускают очень большой плотности размещения элементов. Применение же многослойных структур и ферритового кипера значительно усложняет технологию плат ЗУ и удорожает их изготовление.

Одним из путей преодоления этих недостатков является применение цилиндрических магнитных пленок (магнитной проволоки).

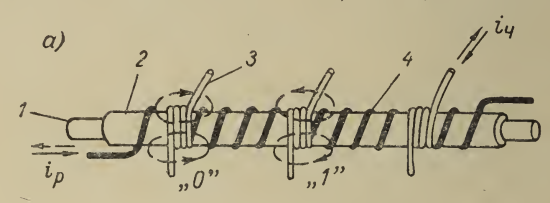
Впервые цилиндрический пленочный запоминающий элемент, получивший название «род» (от английского rod — стержень), был разработан в лабораториях фирмы «Нейшнл кэш редиспстер», США в 1958 г.

Он предсталял собой стеклянный стержень диаметром 0,25 — — 0,5 *мм*, покрытый слоем серебра, на который электролитическим путем наносится тонкая железоникелевая магнитная пленка. Запоминающим элементом, предназначенным для хранения одного двоичного разряда, служит отрезок стержня, на котором расположены четыре обмотки: две адресных, одна обмотка считывания и одна обмотка запрета записи.

В первоначальной конструкции [8-37] магнитная пленка имела состав 98% Fe и 2% Ni и толщину около 3000 Å. Коэффициент прямоугольности ее петли гистерезиса составлял около 0,98. Все обмотки имели по 10 витков. При величине тока возбуж-

дения в обмотке 200 *ма* сигнал считывания достигал 500 *мв* при времени переключения около 70 *нсек*. При плотности размещения 3—4 элемента на 1 *см* длины стержня взаимного влияния элементов практически не наблюдается.

Впоследствии та же фирма стала наносить магнитную пленку состава 97% Fe, 3% Ni методом электролиза на проволоку из сплава меди и бериллия диаметром 0,25 *мм* [8-27]. Толщина пленки составляет 4000 Å. Пленка изотропна, имеет прямоугольную петлю гистерезиса и большую коэрцитивную силу (до 1300 *а/м*). Запоминающие элементы образуются участками стержня с магнитной пленкой (до 4 элементов на 1 *см*) и двумя обмотками, одна



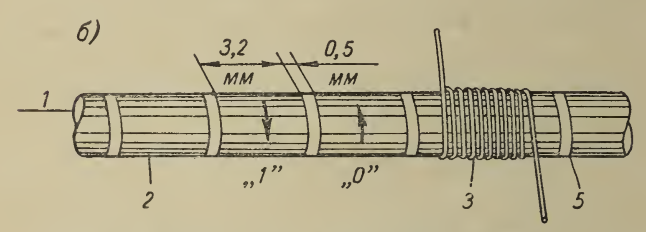


Рис. 8-12. Элемент типа «род» фирмы «NCR»: *а* — на изотропной пленке; *б* — на анизотропной пленке.

1 — медно-бериллиевая проволока; *2* — пермаллоевая пленка; *3* — числовая обмотка; *4* — разрядная обмотка записи-считывания; *5* — травленые участки.

из которых выполняет функции числовой, а вторая — разрядной (рис. 8-12, *а*). Разрядная обмотка представляет собой ленту сечением 0,25 × 0,06 *мм*², нанесенную поверх пленки в виде винтовой линии с плотностью 40 витков на 1 *см* длины проволоки. Числовые обмотки выполнены в виде десятивитковых соленоидов с внутренним диаметром около 0,5 *мм*.

Таким образом, элемент имеет разомкнутый магнитопровод, что делает его плохо защищенным от внешних полей. Кроме того, размагничивающие поля, обусловленные разрывами магнитопровода, ограничивают плотность хранения информации. Частичная нейтрализация этих нежелательных явлений достигается за счет большой коэрцитивной силы магнитной пленки.

В последние годы фирма «NCR» разработала более совершенные элементы «род» на анизотропных цилиндрических пленках [8-31]. Эти элементы (рис. 8-12, *б*) создаются также, как и описан-

ные выше, на медно-бериллиевой проволоке диаметром 0,25 *мм*, но магнитное покрытие наносится на нее электролитическим путем при одновременном пропускании тока по центральному проводнику, благодаря чему в пленке создается анизотропная структура с направлением легкого намагничивания, ориентированным по окружности. При этом возникают благоприятные условия для переключения элемента за счет вращения вектора намагниченности, магнитный поток в статическом состоянии замыкается полностью в пленке, и практически ничтожно малой становится величина размагничивающего фактора. Последнее обстоятельство, в свою очередь, позволяет использовать значительно более толстые пленки (в данном случае 10 000 Å) и, следовательно, получать

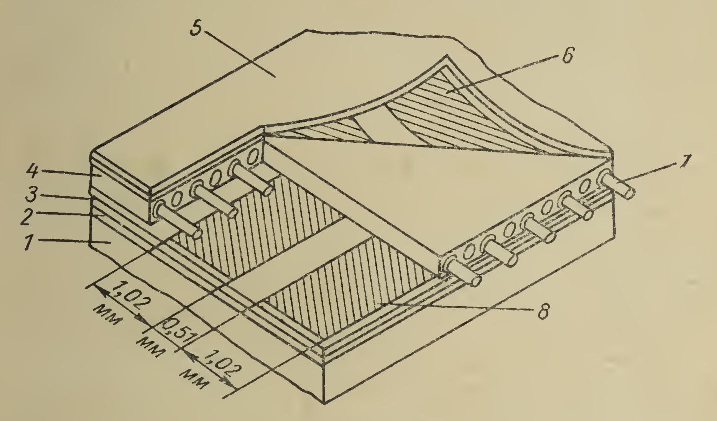


Рис. 8-13. Схематическая конструкция участка платы фирмы «Юнивак».

1 — экранирующая панель; *2* — прокладка; *3* и *5* — эпоксидная смола, армированная стекловолокном; *4* — пленка «каптон»; *6* и *8* — медная числовая шина; *7* — проволока с магнитным покрытием.

много больший сигнал считывания. Для устранения взаимного влияния запоминающих элементов между ними вытравливаются разделительные «пояски» шириной 0,5 *мм*. Запоминающие элементы образуются участками пленки длиной 3,2 *мм* и числовыми обмотками, представляющими собой десятивитковые соленоиды с внутренним диаметром 0,5 *мм* и длиной 1,6 *мм*. В качестве разрядной шины используется центральный проводник.

Еще более технологичной и перспективной разработкой являются запоминающие элементы на проволоке с магнитным пленочным покрытием, созданные в лабораториях фирмы «Юнивак» (США) [8-16]. Здесь применена проволока из бериллиевой бронзы диаметром 0,13 *мм* с сплошным пермаллоевым покрытием толщиной около 10 000 Å. В качестве числовых проводов используются одновитковые медные шины. Плотность размещения элементов вдоль запоминающей проволоки достигает 6—8 элементов на сантиметр.

На рис. 8-13 изображена схематически конструкция участка запоминающей платы фирмы «Юнивак». Система параллельных проволок с магнитным покрытием помещена между двумя листами тугоплавкой пленки «кептон», подобной майлару, покрытой тефлоном. Медные числовые шины шириной 1,02 *мм* нанесены на эпоксидную смолу, армированную стекловолокном. Расстояние между соседними шинами равно 0,51 *мм*.

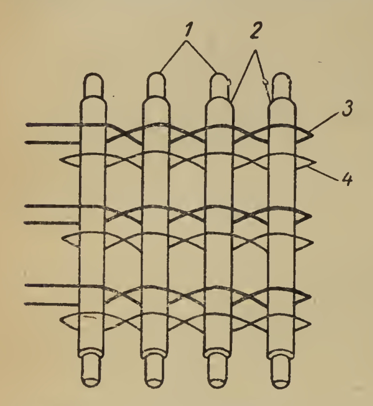


Рис. 8-14. Схематическая конструкция матрицы тканого ЗУ.

1 — проволока из фосфористой бронзы; *2* — пермаллоевая пленка; *3* — числовая обмотка; *4* — разделительная обмотка.

Японская фирма «Токо» в 1963 г. разработала технологию поточного изготовления запоминающих матриц на основе проволоки с магнитным покрытием методами ткацкого производства [8-33, 8-34]. Их конструкция показана схематически на рис. 8-14. Запоминающие проводники, выполняющие одновременно роль разрядных шин записи-считывания, изготовлены из фосфористой бронзы диаметром 0,2 *мм* и покрыты анизотропной пермаллоевой пленкой толщиной 5000—7000 Å. Ортогонально запоминающим проводникам вплетены числовые обмотки и параллельно им — холостые разделительные обмотки, предназначенные для обеспечения заданного расстояния между числовыми обмотками. Числовые и разделительные обмотки выполнены из одинакового медного провода диаметром 0,07 *мм* с полиуретановой или эпоксидной изоляцией. Электрические параметры запоминающих элементов тканой матрицы таковы. Токи записи: в числовой шине — 500 *ма*, в разрядной шине — 65 *ма*. Сигнал считывания информации не менее 1,5 *мв* при токе опроса в числовой шине 200 *ма* и времени нарастания фронта 40 *нсек*.

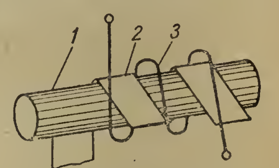


Рис. 8-15. Схематическая конструкция твистора.

1 — медная проволока; *2* — лента из магнитного материала; *3* — числовая обмотка.

К цилиндрическим пленочным элементам примыкает, хотя и отличается в существенных деталях, ферромагнитный запоминающий элемент, получивший название твистора (от англ. twist — скручивать). Одна из современных конструкций твистора изображена на рис. 8-15. Медный провод диаметром 0,08 *мм* обмотан по спирали под углом 45° плоской анизотропной пермаллоевой лентой шириной 0,13 *мм* и толщиной 8 *мкм*. При длине запоминающего элемента около 2,5 *мм* сигнал считывания достигает 6—8 *мв*. Подробное описание твисторов приведено в [1-11, 1-2, 8-23].

8-5. Запоминающие устройства на цилиндрических магнитных пленках

Исследованию и конструированию ЗУ на цилиндрических магнитных пленках за последние годы уделяется исключительно большое внимание. В этих ЗУ сочетаются хорошая технологичность, а также преимущества пленочных элементов с присущим им высоким быстродействием и ферритовых сердечников с замкнутым магнитопроводом, обеспечивающим хорошее отношение сигнал/помеха при считывании информации.

Некоторые ЗУ на цилиндрических пленках применены уже в новых ЦВМ. Так, специально для машины *NCR* 315 *RMC* разработано ЗУ на описанных выше элементах «род» с изотропной пленкой [8-27]. Это ЗУ характеризуется временем выборки 300 *нсек* и полным циклом 800 *нсек*. Емкость его составляет 20 тысяч 13-разрядных чисел с возможностью наращивания до 80 тыс. чисел.

Та же фирма «NCR» разработала макет ЗУ на анизотропных цилиндрических элементах «род» (рис. 8 —12, *б*) емкостью 512 36-разрядных чисел с полным циклом 100 *нсек* [8-31]. Столь высокое быстродействие достигнуто за счет тщательного анализа и отработки всех деталей конструкции накопителя и схем управления, а также широкого использования в последнем возможностей современных интегральных схем.

Числовые шины возбуждаются импульсами тока с амплитудой 200 *ма*, длительностью 60 *нсек* и временами нарастания и спада по 20 *нсек*. Амплитуда сигнала на входе усилителя считывания не менее ±20 *мв*. Ток записи в разрядной шине ±25 *ма* с временем нарастания — 15 *нсек*.

Меньшим быстродействием, но зато значительно большей информационной емкостью характеризуется макет ЗУ фирмы «Юнивак», выполненный на платах, изображенных на рис. 8-13. Емкость макета составляет 16384 9-разрядных чисел при неразрушающем считывании и времени полного цикла 500 *нсек* [8-35].

В работе [8-16] сообщается об изготовлении фирмой «Юнивак» экспериментального модуля ЗУ на магнитной проволоке емкостью 8 млн. *бит*, имеющего форму платы размером 120 × 240 *см*. Для построения такого ЗУ емкостью до 100 млн. *бит* необходимо собрать стопу из двенадцати таких модулей.

В течение ближайшего десятилетия, наряду с дальнейшим совершенствованием ЗУ на ферритовых сердечниках и интегральных ферритовых элементах, все более широкое применение начнут получать ЗУ на магнитных пленках, причем более перспективными, по-видимому, следует считать цилиндрические магнитные пленки.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

9-1. Запоминающие устройства на линейных конденсаторах

Одним из возможных принципов хранения информации является использование явления накопления электрических зарядов. На этом принципе предложены и реализованы различные электростатические ЗУ на линейных и ферроэлектрических конденсаторах и на электроннолучевых трубках. Наиболее просто этот принцип реализуется в ЗУ на обычных линейных конденсаторах.

Если приписать разряженному и заряженному состоянию конденсатора соответственно значения «0» и «1» или использовать для обозначения «0» и «1» знак полярности, то из n конденсаторов можно составить регистр, пригодный для запоминания n-разрядного числа.

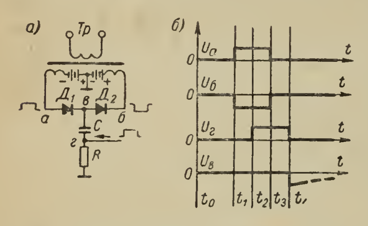


Рис. 9-1. Ячейка ЗУ на конденсаторах и диодах: *а* — схема ячейки; *б* — временна́я диаграмма записи информации.

Хотя стоимость ЗУ большой емкости на линейных конденсаторах оказывается довольно высокой из-за относительной сложности схем записи и считывания, конденсаторные ЗУ обладают некоторыми достоинствами. Их можно собрать полностью из обычных радиоэлектронных деталей, не прибегая к специальным элементам. Можно использовать для записи и получать при считывании импульсы большой амплитуды, порядка единиц и даже десятков вольт, без их дальнейшего усиления.

Основной проблемой при создании электростатических ЗУ на конденсаторах является решение задачи длительного хранения информации, связанное с ее постепенным разрушением из-за разряда конденсаторов за счет утечек. Это требует разработки соответствующих схем записи и считывания и регенерации информации.

Схема запоминающего элемента на конденсаторах, в которой достаточно успешно решены эти проблемы, была разработана Холтом [9-21] для машины СЕАК (США).

Схема и временна́я диаграмма записи информации элемента приведены на рис. 9-1. Основными деталями здесь являются конденсатор C и два диода $Д_1$ и $Д_2$, почему элемент и получил название диодно-конденсаторного. К концам вторичных обмоток дифференциального трансформатора подведены равные по абсолютной величине отрицательное и положительное напряжения смещения относительно земли. Оба диода этим напряжением заперты, а потенциал относительно земли средней точки *в* вследствие симметрии схемы равен нулю.

При записи в момент времени t_1 на первичную обмотку трансформатора $Тр$ подается импульс напряжения, который обеспечивает появление в точке $а$ положительного потенциала $U_а$ и в точке $б$ отрицательного потенциала $U_б$. При этом оба диода отпираются, но вследствие симметрии схемы потенциал точки $в$ остается равным нулю.

Далее, в момент времени t_2, в точку $г$ подается положительный импульс записи информации, которым нижняя пластина конденсатора C заряжается до некоторого положительного потенциала относительно нулевого потенциала точки $в$. В момент t_3, когда прекращается подача импульсов через трансформатор, диоды снова запираются напряжениями смещения и точка $в$ вновь оказывается изолированной от земли.

Наконец, в момент t_4, когда прекращается подача импульса записи, потенциал нижней обкладки конденсатора относительно земли становится равным нулю. Но так как верхняя обкладка конденсатора при этом изолирована от всей схемы, то заряд остается неизменным и, следовательно, на верхней обкладке появляется отрицательный потенциал $U_в$, равный по абсолютной величине амплитуде импульса записи $U_г$.

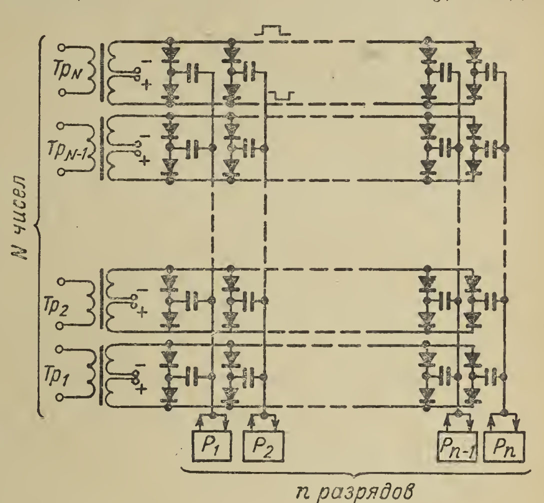


Рис. 9-2. Схема ЗУ на диодно-конденсаторных ячейках емкостью N чисел по n разрядов.

В дальнейшем, если схема не будет подвергаться никаким внешним воздействиям, то вследствие утечки через запертые диоды $Д_1$ и $Д_2$ конденсатор начнет постепенно разряжаться. При этом напряжение на его верхней обкладке $U_в$ будет изменяться по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = C\,(R_{обр}/2)$, где C — емкость конденсатора, а $R_{обр}$ — обратное сопротивление одного диода. Поэтому для сохранения информации в течение сколь угодно длительного времени необходима периодическая регенерация заряда конденсатора C.

На рис. 9-2 приведена схема диодно-конденсаторного ЗУ емкостью N чисел по n разрядов.

Как видно из схемы, каждая цепь регенерации Р предназначается для регенерации информации в определенном разряде всех числовых регистров ЗУ. В свою очередь каждый числовой регистр для запоминания n-разрядного числа, состоящий из n

диодно-конденсаторных элементов, подключенных параллельно к общим шинам, возбуждается одним из N числовых трансформаторов Tp.

В процессе регенерации на первичные обмотки трансформаторов поочередно подаются импульсы, обеспечивающие одновременную регенерацию всех разрядов одного выбранного в данный момент числа, а затем другого, третьего и так далее чисел. После регенерации N-го числа вновь происходит регенерация первого числа и далее в той же последовательности.

Оценивая рассмотренные ЗУ, следует указать на возможность создания таких ЗУ емкостью в несколько тысяч чисел при условии применения специальных диодов с очень большим отношением обратного и прямого сопротивлений.

Время обращения к диодно-трансформаторному ЗУ может быть доведено до нескольких десятков наносекунд. Как уже упоминалось ранее, при работе с этими устройствами можно оперировать сигналами с достаточно большой амплитудой.

Диодно-конденсаторные ЗУ обладают большой механической прочностью и вибростойкостью, а при изготовлении их могут успешно использоваться методы интегральной технологии. Это, наряду с простотой схемы и эксплуатации, делает возможным применение их в вычислительных машинах специального назначения.

Как недостаток этих ЗУ нужно отметить необходимость применения большого количества диодов (по два диода на каждую двоичную цифру), что приводит к снижению надежности ЗУ большой емкости. Недостатком является необходимость регенерации информации, хотя если ЗУ предназначено для кратковременного хранения информации, то его можно построить по очень простой схеме, не предусматривающей регенерации.

Значительно более надежные, малогабаритные и экономичные быстродействующие ЗУ могут быть построены на ферроэлектрических конденсаторах при условии освоения технологии изготовления хороших ферроэлектриков.

9-2. Запоминающие устройства на ферроэлектрических конденсаторах

Одним из видов ЗУ являются устройства, в которых используется эффект д и э л е к т р и ч е с к о г о г и с т е р е з и с а, имеющий место в некоторых веществах — сегнетоэлектриках — и обусловленный наличием в этих веществах спонтанной (самопроизвольной) поляризации, возникающей в определенном температурном интервале.

Свое название сегнетоэлектрики получили в связи с тем, что аномальные диэлектрические свойства, присущие этим веществам, впервые наблюдались в 1917 г. на образце из сегнетовой соли

($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$), полученной Сегнетом еще в 1672 г. Сегнетоэлектрические явления изучал в 30-х годах в СССР И. В. Курчатов, и он же разработал основы физической теории сегнетоэлектриков.

В 1944 г., в СССР, Б. М. Вул и И. М. Гольдман открыли первый сегнетоэлектрик — титанат бария ($BaTiO_3$), не содержащий водорода и обладающий рядом весьма ценных свойств по сравнению с сегнетовой солью. Этот материал получил преимущественное применение в последующих разработках ЗУ, основанных на эффекте диэлектрического гистерезиса.

Особое свойство сегнетоэлектриков — наличие двух устойчивых поляризованных состояний, смена которых происходит в зависимости от знака и величины приложенного электрического поля, — позволило применить их для запоминания цифровых сигналов.

По сути дела, применение сегнетоэлектриков в ЗУ — это развитие принципа ЗУ на конденсаторах. Однако при использовании сегнетоэлектрика в качестве диэлектрического заполнителя конденсатора у последнего возникает свойство остаточной поляризации, весьма похожей на остаточное намагничивание ферромагнетиков. Это свойство, а также и то, что величина и знак поляризации сегнетоэлектриков неоднозначно зависят от электрического поля, т. е. наблюдается диэлектрический гистерезис, позволило на их основе создать бистабильные накопительные конденсаторы для ЗУ. По аналогии с ферромагнетиками сегнетоэлектрические материалы в технической литературе обычно называют ферроэлектриками.

Явление поляризации диэлектриков характеризуется величиной электрического момента единицы объема. Эту величину называют поляризацией диэлектрика и обозначают буквой P.

Отношение поляризации к величине напряженности электрического поля E носит название коэффициента поляризации или диэлектрической восприимчивости:

$$\varkappa = \frac{P}{E}. \tag{9-1}$$

Ферроэлектрики в отличие от обычных диэлектриков проявляют резкую нелинейность зависимости $P = f(E)$ в сегнетоэлектрической области, так как при температуре ниже точки Кюри $\varkappa$ зависит от приложенного электрического поля. Диэлектрическая восприимчивость $\varkappa$ связана с диэлектрической проницаемостью ε следующей зависимостью:

$$\varkappa = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi}. \tag{9-2}$$

Так как диэлектрическая проницаемость в ферроэлектриках ниже точки Кюри достигает очень больших величин (от сотен

до десятков тысяч единиц), то можно положить

$$\varkappa \approx \frac{\varepsilon}{4\pi}, \qquad (9\text{-}3)$$

откуда

$$P \approx \frac{\varepsilon}{4\pi} E. \qquad (9\text{-}4)$$

Указанные зависимости аналогичны соответствующим зависимостям для магнитной восприимчивости и намагниченности для ферромагнетиков. График зависимости $P = f(E)$ для ферроэлектриков представляет собой замкнутую кривую (рис. 9-3), аналогичную петлям магнитного гистерезиса. Обычно эту кривую характеризуют коэффициентом прямоугольности

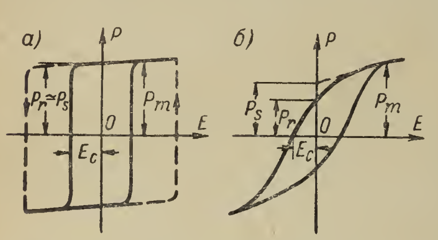


Рис. 9-3. Петли гистерезиса: *а* — монокристаллического образца; *б* — поликристаллического образца.

$$K_{\text{пр}} = \frac{P_r}{P_m}, \qquad (9\text{-}5)$$

величина которого достигает в образцах титаната бария 95%.

Первые образцы запоминающих элементов изготовлялись из соответствующим образом обработанных монокристаллов титаната бария [9-15, 9-28, 9-27]. Простейшая конструкция такого запоминающего элемента представляет собой монокристалл сегнетоэлектрика, заключенный между двумя миниатюрными шинами (электродами X и Y), на которые подается сигнал определенной величины и знака. Знак поляризации элемента зависит от знаков напряжений U_X и U_Y, которые должны быть, очевидно, всегда разноименны.

За начальное состояние примем то положение вектора электрической поляризации относительно оси c, при котором остаточная поляризация P_r отрицательна, как показано на рис. 9-4, *а*. Припишем этому состоянию значение «0». Если теперь, подавая на шину X напряжение $-U/2$, а на шину Y напряжение $+U/2$, создадим в монокристалле напряженность поля $+E$, направленную по оси c, как показано на рис. 9-4, *б*, то осуществится поворот диполей, и знак остаточной поляризации изменится. Припишем этому состоянию элемента с положительной остаточной поляризацией значение «1».

Считывание производится подачей на монокристалл импульса напряженности электрического поля обратного знака, т. е. $-E$ (рис. 9-4, *в*). При этом, если в элементе был записан нуль, то знак поляризации не меняется и импульс тока $i = dQ/dt$ через монокристалл будет очень мал (изменение поверхностного заряда определяется лишь крайне незначительной индуцированной поляризацией), т. е. будет считан нуль. Если же была записана единица

то в момент переполяризации через элемент пройдет значительный импульс тока, т. е. будет считана единица.

Принципиальная схема включения ферроэлектрического конденсатора как элемента ЗУ приведена на рис. 9-5, *а*. Подавая на вход импульсы достаточной амплитуды соответствующего знака, можно переключать элемент из одного устойчивого состояния в другое. Считывание информации производится подачей на вход импульса, совпадающего по направлению с импульсом записи нуля, т. е. — U. Если запоминающий конденсатор находился в состоянии, соответствующем записи единицы, то поляризация изменится, через обычный конденсатор C, включенный для уменьшения потерь энергии и уменьшения постоянной времени контура, пройдет импульс тока, который создаст на сопротивлении R и, следовательно, на выходе сигнал считывания. Однако при этом происходит разрушение записанной информации, которую необходимо восстановить.

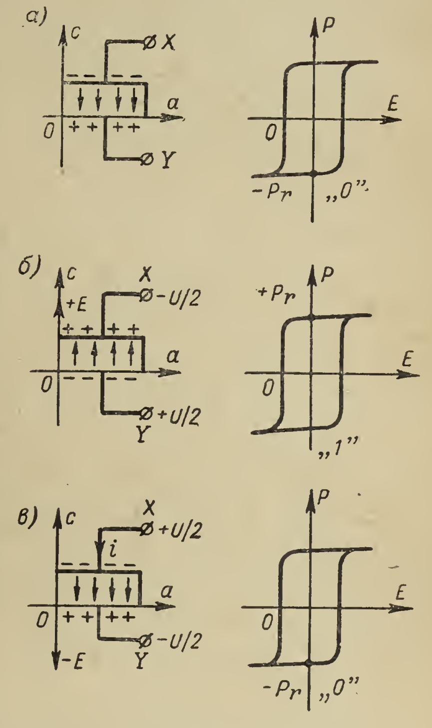


Рис. 9-4. Различные состояния запоминающего элемента: *а* — начальное состояние элемента, соответствующее записи нуля; *б* — запись единицы; *в* — считывание единицы и возврат элемента в начальное состояние.

Для осуществления неразрушающего считывания предложено несколько различных способов, из которых наиболее интересными с практической точки зрения являются [9-11]: а) считывание поперечным электрическим полем; б) считывание с применением ультразвука; в) оптическое считывание (пригодное только для оптически прозрачных ферроэлектриков); г) считывание с использованием частичного переключения [9-31].

Время переключения ферроэлектрического элемента T_S при достаточно сильных полях прямо пропорционально толщине кристалла d и обратно пропорционально скорости v, с которой прорастают домены:

$$T_S = \frac{d}{v}. \tag{9-6}$$

Найдено [9-25], что $v = 3{,}82 \cdot 10^4$ *см/сек* для кристалла титаната бария в целом. Однако время переключения пропорционально толщине кристалла, лишь начиная с определен-

ной величины d, ниже которой пропорциональность нарушается.

Надежность работы запоминающего элемента определяется отношением выходного импульса, получаемого при переполяризации элемента, к выходному импульсу, когда элемент не переполяризуется. Это отношение называется дискриминантом. Дискриминант зависит от паразитных емкостей и при больших площадях электродов может достигать 50 и даже 100.

Ячейки на монокристалле титаната бария с площадью электродов 0,01 *мм*² имеют величину дискриминанта $\Delta = 7 \div 15$.

Наиболее пригодной конструкцией ферроэлектрических ЗУ является матричная схема. На рис. 9-5, *б* изображена схема

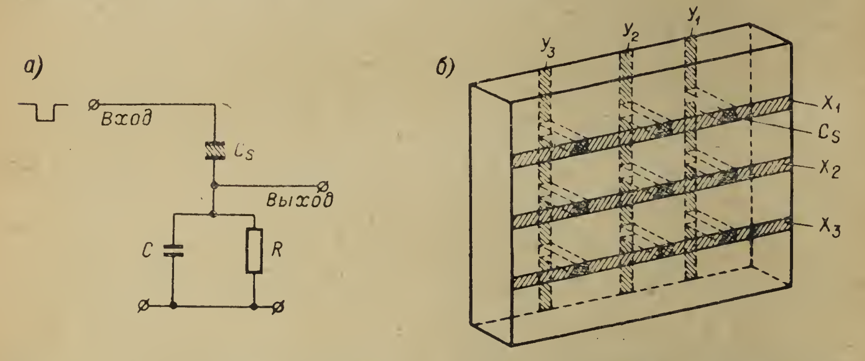


Рис. 9-5. ЗУ на ферроэлектриках: *а* — схема включения запоминающего элемента; *б* — схема запоминающей матрицы на монокристалле.

матрицы, которая может быть использована для промышленных образцов ферроэлектрических ЗУ. Здесь вертикальные электроды, наклеенные на монокристалл ферроэлектрика с обратной стороны, являются столбцами разрядов, а горизонтальные — строками чисел. Пересечения электродов образуют миниатюрные бистабильные конденсаторы с ферроэлектрическим заполнением, каждый из которых может запомнить одну двоичную цифру.

Поляризация осуществляется подачей на соответственно выбранные электроды половины величины переполяризующего напряжения определенной полярности:

$$|U_X| = |U_Y| = \frac{1}{2}|U_p|, \qquad (9\text{-}7)$$

где U_p — переполяризующее напряжение.

Современная технология выращивания монокристаллов наиболее употребительного ферроэлектрика — титаната бария — не позволяет получать образцы достаточно большой площади. Практически площадь монокристалла титаната бария лежит в пределах 1 *см*². Однако уже и в таких сравнительно малых габаритах ферроэлектрическое устройство может запомнить до 1000—2000 *бит* информации.

Одним из важнейших недостатков первых запоминающих элементов на монокристаллах титаната бария являлось значительное изменение их диэлектрических характеристик в зависимости от числа переключений (явление «усталости»). Недавние улучшения в получении материала и обработке позволили получить элементы, характеристики которых меняются значительно меньше.

Вообще к ферроэлектрическим материалам для накопительных элементов предъявляются следующие требования:

1) материал должен обладать прямоугольной петлей гистерезиса в заданных диапазонах частот и температур;

2) время переключения T_S, т. е. время перемены знака спонтанной поляризации, должно быть минимальным;

3) остаточная поляризация P_r должна быть максимальной, так как от ее величины зависит величина импульса тока, и длительно сохраняться;

4) коэрцитивная сила E_c не должна быть большой, так как в противном случае потребуется создавать слишком большие напряженности поля для переориентации доменов;

5) площадь петли диэлектрического гистерезиса не должна быть слишком большой, так как ее величиной определяются потери энергии на разогрев образца;

6) материал должен быть по возможности дешевым и изготовление из него монокристаллических образцов должно быть не слишком сложным.

Все эти разнообразные требования по существу связаны между собой, поэтому выбор того или иного материала определяется не граничными, а оптимальными величинами.

Кроме хорошо исследованного и нашедшего широкое применение титаната бария, существует ряд сегнетоэлектриков, которые могут быть использованы в качестве материала для ЗУ. Характеристики некоторых из них помещены в табл. 9-1.

Таблица 9-1

Материал	Спонтанная поляризация, *мккул/см²*	Коэрцитивная сила, *кв/см*	Время переполяризации, *мксек*	Температура Кюри, °С
Монокристалл титаната бария . . .	22—26	1,0	~1	+120
Сернокислый гуанидин алюминия .	0,36	2,5	~100	+300
Сульфат триглицина	2,2	0,22	~5	+47
Манганит иттрия	5,5	—	~0,1	+700
Цирконат-титанат свинца	35	8	—	—

Сегнетова соль не может применяться в ЗУ, так как, несмотря на сравнительную легкость получения и обработки, она обладает целым рядом недостатков: механически непрочна, гигроскопична, термически неустойчива, проявляет сегнетоэлектрические

свойства в узком (от —18 до +24° С) интервале температур и разрушается электрострикционными явлениями. Последнее имеет место и в титанате бария.

При сравнении электрических, временны́х и температурных характеристик указанных материалов видно, что оптимальными данными обладает титанат бария, тем более, что время переключения его одного порядка со временем переключения сульфата триглицина. Все эти ферроэлектрики имеют общее свойство — отсутствие порогового поля, обусловленное нелинейными зависимостями тока и времени переполяризации от величины поданного напряжения.

Благодаря высокой точке Кюри накопительные элементы из гуанидина алюминия не нуждаются в охлаждении, в то время как элементы из титаната бария (из-за большой величины диэлектрических потерь и невысокой точки Кюри) и сульфата триглицина (из-за низкой точки Кюри) требуют интенсивного охлаждения. Правда, точка Кюри сульфата триглицина может быть [9-9] повышена до 60° С при замене некоторых атомов водорода атомами дейтерия.

Недостатками гуанидина алюминия по сравнению с титанатом бария и сульфатом триглицина являются более медленная переполяризация и довольно большая коэрцитивная сила. Положительными свойствами гуанидина алюминия являются малые диэлектрические потери, малая величина электрострикции, высокая точка Кюри, и, главное, отсутствие явления усталости и простота изготовления монокристаллов.

Представляет интерес как материал для ферроэлектрических ЗУ полученный в 1957 г. сульфат триглицина, который характеризуется минимальной коэрцитивной силой, наименьшими диэлектрическими потерями и небольшим временем переключения. Сульфат триглицина химически устойчив, не разлагается под действием воздуха и влаги, механически прочен, а многократная повторная переполяризация сульфата триглицина не вызывает в нем признаков усталости. Низкая точка Кюри может быть в значительной степени компенсирована малыми диэлектрическими потерями и возможностью улучшения теплоотвода. Кроме того, сегнетоэлектрические свойства сульфата триглицина полностью восстанавливаются при последующем охлаждении в случае нагрева выше точки Кюри.

Весьма многообещающие результаты получены при исследовании созданного во Франции нового монокристаллического ферроэлектрика — манганита иттрия $YMnO_3$ [9-19]. Благодаря очень высокой точке Кюри он хорошо работает при температуре до +200° С и при частоте более 200 *кгц*. Время переключения напряжением 100 *в* составляет около 0,1 *мксек* при хорошем отношении сигнала к помехе. Сигнал считывания достигает 1 *в* при площади электродов 0,04 *мм*². Наконец, в нем практически не наблюдаются явления старения и усталости.

Имеются также сообщения об успешных опытах применения в качестве запоминающих элементов сегнетоэлектрических керамических материалов, например, цирконата-титаната свинца [9-30]. Этот керамический ферроэлектрик, получивший название PZT 65/35, может работать в широком диапазоне температур от —55 до +125° С и выдерживает без заметного ухудшения параметров по меньшей мере 10^7 циклов переполяризации.

Первые попытки применения ферроэлектрических запоминающих элементов совпали по времени с созданием первых ферритовых элементов с ППГ. При этом казалось, что благодаря высокой экономичности, большой удельной плотности информации, достаточному быстродействию и значительным сигналам считывания ЗУ на ферроэлектриках могут стать серьезными конкурентами ферромагнитным ЗУ. Но такие недостатки, как трудность изготовления монокристаллов с высокой точкой Кюри, временна́я нестабильность и явление «усталости», наблюдавшиеся у первого «классического сегнетоэлектрика» — титаната бария и, хотя и в меньшей степени, у других сегнетоэлектриков, а также существенные достижения в разработке ферромагнитных ЗУ, обусловили значительное ослабление интереса к ферроэлектрическим ЗУ.

Однако за последние годы вновь возрос интерес к разработке ферроэлектрических ЗУ относительно небольшой емкости и невысокого быстродействия. Современные ферроэлектрики позволяют строить миниатюрные ЗУ, сравнимые по размерам с другими микроэлектронными модулями. Свойственные ферроэлектрическим ЗУ высокие уровни сигналов считывания допускают непосредственное возбуждение интегральных логических схем, что облегчает решение задач микроминиатюризации.

9-3. Физические принципы накопления информации в электроннолучевых приборах

Для накопления информации в большинстве накопительных электроннолучевых приборов используется явление образования на диэлектрических экранах так называемого потенциального рельефа под влиянием бомбардировки элементов экрана электронами и связанного с этим процесса вторичной электронной эмиссии. Поэтому описанию работы накапливающих информацию электроннолучевых приборов необходимо предпослать рассмотрение явления вторичной электронной эмиссии. Это явление было открыто в 1902 г. Остином и Штарке, которые, изучая отражение катодных лучей от металлических поверхностей, обнаружили, что количество испускаемых мишенью электронов может превосходить количество электронов, падающих на ее поверхность. Впоследствии явление вторичной электронной эмиссии всесторонне исследовано в трудах зарубежных ученых Ленарда, Брюининга, Мак-Кэя, Коллера и др. и советских ученых

П. В. Тимофеева, Н. С. Хлебникова, Д. В. Зернова, Л. А. Кубецкого и др.

На первой стадии развития электроники вторичная электронная эмиссия рассматривалась как вредное явление, нарушающее нормальную работу электронных ламп вследствие обусловленного ею динатронного эффекта. В настоящее время явление вторичной электронной эмиссии широко используется в технике главным образом для вторично-электронного усиления в фотоумножителях и для накопления заряда на экранах накопительных электроннолучевых трубок, предназначенных для хранения информации. Дальнейшее рассмотрение физических процессов и явлений, связанных с вторичной электронной эмиссией, проводится под углом зрения использования их в накопительных электроннолучевых приборах.

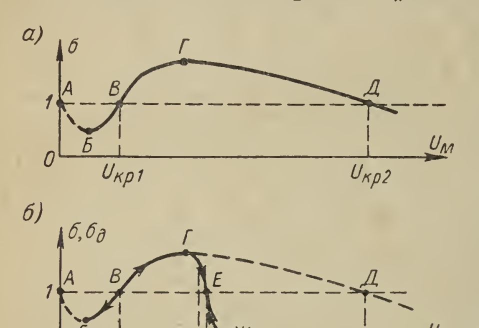


Рис. 9-6. Зависимость коэффициента полной (*а*) и действующей (*б*) вторичной эмиссии от потенциала мишени.

При облучении (бомбардировке) поверхности тел пучком электронов возникает явление испускания электронов этими телами, т. е. появляется поток вторичных электронов, направленный навстречу первичным электронам, бомбардирующим поверхность тела.

Отношение тока i_2, создаваемого всеми вторичными электронами, к току первичных электронов i_1 называют коэффициентом полной вторичной эмиссии σ:

$$\sigma = \frac{i_2}{i_1}. \tag{9-8}$$

На рис. 9-6, *а* представлена кривая зависимости коэффициента полной вторичной эмиссии от энергии первичных электронов, выраженной в электроновольтах и численно равной величине ускоряющего первичные электроны потенциала мишени относительно катода $U_м$.

При очень малых энергиях первичных электронов истинно вторичные электроны отсутствуют, а часть первичных электронов отражается обратно на катод, вследствие чего коэффициент вторичной эмиссии $\sigma < 1$ и при приближении энергии первичных электронов к нулю σ стремится к единице (пунктирный участок кривой *АВ*). При увеличении энергии первичных электронов начинается выбивание из мишени вторичных электронов, ток вторичной эмиссии растет и соответственно растет коэффициент вторичной эмиссии (участок *БГ* кривой). При этом он проходит

через значение $\sigma = 1$ (точка B), соответствующее некоторому потенциалу, получившему название первого критического потенциала $U_{кр1}$.

Далее функция $\sigma = f(U_м)$ достигает максимума (точка $Г$), после которого она монотонно убывает, стремясь к нулю при сильном возрастании энергии первичных электронов. В процессе убывания функция $\sigma = f(U_м)$ вновь проходит значение $\sigma = 1$ (точка $Д$), соответствующее так называемому второму критическому потенциалу $U_{кр2}$.

Для отбора и последующего удаления из трубки отработавших вторичных электронов служит специальный электрод — коллектор, на который подается положительный потенциал. Однако поле между коллектором и мишенью оказывается не всегда достаточным для отбора всех вторичных электронов, и некоторая часть их может возвращаться обратно на мишень. Тогда полный ток в цепи коллектора $i_к$ будет меньше тока вторичной электронной эмиссии i_2. Поэтому было введено понятие коэффициента действующей вторичной электронной эмиссии

$$\sigma_д = \frac{i_к}{i_1}, \quad (9\text{-}9)$$

где $i_к$ — ток в цепи коллектора; i_1 — ток первичных электронов. Так как $i_к \leqslant i_2$, то, очевидно, и $\sigma_д \leqslant \sigma$.

На рис. 9-6, *б* сплошной линией показана зависимость коэффициента действующей вторичной электронной эмиссии $\sigma_д$ от потенциала мишени относительно катода $U_м$ для значений потенциала коллектора $U_к$, заключающихся в пределах от $U_{кр1}$ до $U_{кр2}$ ($U_{кр1} < U_к < U_{кр2}$). Пунктирной линией изображена рассмотренная выше зависимость коэффициента полной вторичной эмиссии σ от потенциала мишени.

До тех пор пока потенциал мишени ниже некоторого постоянного потенциала коллектора $U_к$, все вторичные электроны с мишени притягиваются коллектором, токи вторичной эмиссии и коллектора равны между собой ($i_к = i_2$), а следовательно, $\sigma_д = \sigma$ и, как это видно из рисунка, сплошная кривая $\sigma_д = f(U_м)$ и пунктирная $\sigma = f(U_м)$ совпадают. Однако если потенциал мишени превысит потенциал коллектора, то вторичные электроны, эмитированные мишенью, на своем пути к коллектору будут испытывать действие тормозящего электрического поля тем более сильного, чем больше величина разности потенциалов между мишенью и коллектором $U_м — U_к$.

При очень малой разности потенциалов $U_м — U_к$ значительная часть вторичных электронов, обладающих достаточно большой начальной скоростью вылета, достигает коллектора, и $\sigma_д$ остается больше единицы. По мере же увеличения потенциала мишени $U_м$ и связанного с этим (при постоянном потенциале коллектора $U_к$) роста разности потенциалов $U_м — U_к$ количество вторичных электронов, попадающих на коллектор, быстро снижается, и при

некотором достаточно большом значении $U_м$ вторичные электроны совсем перестают попадать на коллектор и полностью возвращаются на мишень, т. е. $\sigma_д$ становится равным нулю. Описанный процесс, соответствующий значениям $U_м > U_к$, характеризуется участком кривой *ГЕЖ*, наклон которого зависит от распределения вторичных электронов по скорости.

При некотором значении потенциала мишени кривая в точке *E* пересекает линию $\sigma_д = 1$. Эта точка соответствует устойчивому равновесному потенциалу $U_р$, который будет автоматически устанавливаться на всех элементах мишени в результате бомбардировки ее электронами при соблюдении условия $U_{кр1} < U_к < U_{кр2}$. В самом деле, потенциал мишени может оставаться постоянным лишь при условии, что $\sigma_д = 1$.

Если $\sigma_д > 1$ (участок кривой *ВГЕ*), то количество электронов, теряемых мишенью, превышает количество попадающих на нее первичных электронов, что приводит к повышению потенциала мишени и сдвигу точки кривой, характеризующей потенциал мишени, вправо, как показано на рисунке стрелкой.

Если же $\sigma_д < 1$ (участок *ЕЖ*), то происходит накапливание электронов на мишени, автоматически вызывающее понижение ее потенциала и сдвиг точки на кривой влево по направлению стрелки.

Таким образом, точка *E* ($\sigma_д = 1$; $U_м = U_р$), характеризующая состояние системы, к которому приводит процесс вторичной эмиссии независимо от того, в какую сторону имеет место отклонение от этого состояния (стрелки направлены к точке *E* с обеих сторон), является точкой устойчивого динамического равновесия.

Точка *B* ($\sigma_д = 1$; $U_м = U_{кр1}$) является точкой неустойчивого равновесия, ибо любое отклонение от характеризуемого ею состояния приводит к дальнейшему увеличению отклонения (стрелки направлены в обе стороны от точки *B*).

Наконец, точка *A* ($\sigma_д = 1$; $U_м = 0$), соответствующая состоянию, к которому приходит процесс при $U_м < U_{кр1}$, является точкой квазиустойчивого состояния (стрелки направлены к ней только с одной стороны).

Итак, мы установили, что при электронной бомбардировке мишени и наличии на коллекторе потенциала $U_к$ при соблюдении условия $U_{кр1} < U_к < U_{кр2}$ на мишени всегда будет устанавливаться равновесный потенциал $U_р$, несколько бо́льший $U_к$. Направляя при помощи отклоняющей системы электронный луч в нужные точки экрана, соответствующие определенным ячейкам ЗУ, и изменяя потенциалы на тех или иных электродах трубки, т. е. варьируя условия, при которых происходит бомбардировка электронами этих точек экрана, можно добиться появления в этих точках различных по величине равновесных потенциалов. Таким образом и обеспечивается запись информации на экране путем создания различных потенциалов на различных участках, или,

другими словами, путем создания на экране потенциального рельефа определенной конфигурации.

Хотя материалы, применяемые при изготовлении экранов электроннолучевых трубок, и являются достаточно хорошими диэлектриками, например, используемые в трубках люминофоры имеют удельное сопротивление порядка 10^{14} *ом·см*, созданный на экране потенциальный рельеф постепенно расплывается вследствие растекания зарядов по поверхности экрана. Поэтому время, в течение которого может быть осуществлено неискаженное считывание записанной информации, ограничено, и для длительного хранения информации в электроннолучевой запоминающей трубке нужно созданный при записи потенциальный рельеф теми или иными способами либо поддерживать, либо периодически возобновлять (регенерировать).

Впрочем, период регенерации определяется практически не относительно медленным процессом растекания зарядов по поверхности экрана, а значительно более вредным для сохранения информации явлением засева или забрызгивания запоминающих элементов экрана при многократном обращении к соседним элементам. Это явление перераспределения вторичных электронов, весьма отрицательно влияющее на надежность работы трубки в ЗУ, заключается в попадании части вторичных электронов, выбитых из данного элемента экрана, на другие, главным образом соседние элементы, что вызывает изменение потенциала этих элементов и может привести к разрушению записанной на них информации.

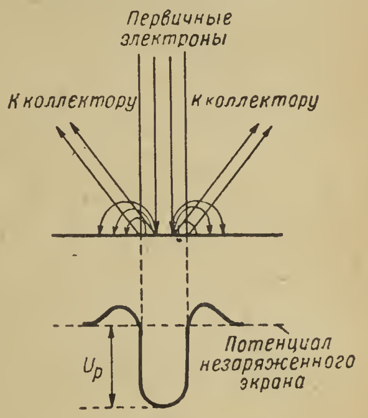


Рис. 9-7. Образование потенциального рельефа при бомбардировке экрана электронным лучом.

Процесс образования потенциального рельефа при бомбардировке экрана электронным лучом иллюстрируется рис. 9-7. Элемент экрана, подвергающийся бомбардировке, приобретает равновесный потенциал $U_р$. Этот элемент, на котором благодаря вторичной электронной эмиссии создается недостаток электронов, называют часто электронной «ямой» или потенциальной «впадиной». Как уже указывалось ранее, не все вторичные электроны притягиваются коллектором.

Если потенциал коллектора ниже потенциала мишени, то часть вторичных электронов возвращается обратно на экран. При этом возврат происходит не только на облучаемый элемент, но и в его окрестности, главным образом на участки, расположенные в непосредственной близости от облучаемого, на расстоянии порядка диаметра луча.

Возвращающиеся на экран электроны образуют, как это видно из рис. 9-7, вокруг электронной «ямки» как бы электронную «насыпь», высота которой быстро снижается по мере удаления от облучаемого элемента. Однако некоторые электроны возвращаются на экран настолько далеко от облучаемого элемента, что могут попасть на соседние запоминающие элементы и, «забрызгивая» их, изменить их потенциал. Такая опасность резко возрастает при многократном повторном обращении к одному и тому же элементу экрана. При этом «забрызгивание» соседних участков может принять такие размеры, что записанная на них информация будет полностью разрушена. Очевидно, что описанное явление сказывается тем сильнее, чем ближе друг к другу расположены запоминающие элементы. Следовательно, оно ограничивает плотность записи, а значит, и общее количество запоминающих элементов растра, т. е. емкость ЗУ. Кроме того, ограничивается и допустимое количество обращений к данному элементу экрана без регенерации информации в соседних элементах, а следовательно, и быстродействие всей системы.

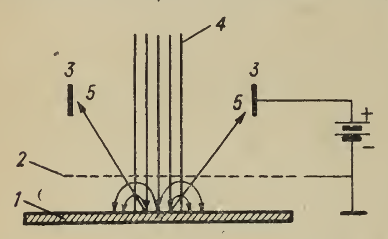


Рис. 9-8. Применение тормозящей (барьерной) сетки для уменьшения «забрызгивания» экрана.

1 — экран; *2* — тормозящая сетка; *3* — коллектор; *4* — первичные электроны; *5* — вторичные электроны.

Поэтому одним из важнейших показателей качества запоминающих электроннолучевых трубок является к о э ф ф и ц и е н т д о п у с т и м ы х о б р а щ е н и й, для краткости называемый часто н а д е ж н о с т ь ю трубки и представляющий собой количество допустимых обращений к какому-либо элементу экрана без нарушения информации, записанной на соседних элементах. Надежность современных запоминающих трубок колеблется от 100 до нескольких тысяч.

Значительного снижения влияния перераспределения вторичных электронов и связанного с этим явления «забрызгивания», а значит, и повышения надежности трубки можно добиться, помещая вблизи от поверхности экрана мелкоструктурную тормозящую б а р ь е р н у ю сетку при одновременной подаче на коллектор положительного относительно всей сетки потенциала (рис. 9-8). При этом вторичные электроны с бо́льшей энергией, пролетевшие сквозь отверстия сетки, захватываются полем, действующим между сеткой и коллектором, и не могут возвратиться на поверхность экрана. Электроны же, обладающие малой энергией, не могут пролететь сквозь отверстия сетки, и так как последняя расположена на весьма малом расстоянии от экрана (0,2 *мм* и менее, а иногда практически и вплотную примыкает к экрану), то они возвращаются на экран в непосредственной близости от элемента, из которого были эмиттированы.

9-4. Запоминающие устройства на электроннолучевых трубках

В устройствах хранения информации могут быть использованы обычные приемные телевизионные или осциллографические трубки без барьерной сетки. Способы и схемы применения их в качестве оперативных ЗУ были разработаны в Манчестерском университете (Англия) под руководством Вильямса [9-32], и поэтому в зарубежной литературе их часто называют трубками Вильямса. Накопителем информации в них является диэлектрический экран. С люминофором экрана емкостно связана примыкающая снаружи к стеклу трубки металлическая сигнальная пластина, предназначенная для считывания записанной информации.

Информация в рассматриваемой системе записывается на избранном элементе экрана в виде пятна, обладающего равновесным потенциалом и имеющего в зависимости от характера информации ту или иную конфигурацию или «рисунок». Так, например, «0» может быть представлен на экране пятном, имеющим форму сфокусированной точки, а «1» — пятном в виде черточки или какой-либо другой фигуры. Таким образом, в результате записи информации мы тем или иным способом перераспределяем на экране заряженные участки, почему система и получила название — система с поверхностным перераспределением зарядов.

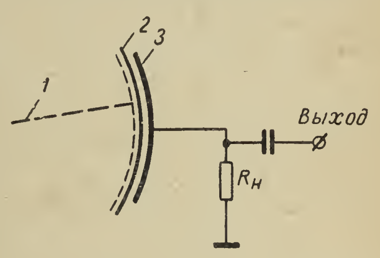


Рис. 9-9. Схема получения сигналов считывания информации.

1 — электронный луч; *2* — экран; *3* — сигнальная пластина.

Считывание записанной информации основано на том, что если направить запертый луч на нужный элемент экрана и внезапно включить его, то на нагрузочном сопротивлении $R_н$, включенном в цепь сигнальной пластины (рис. 9-9), возникают импульсы, полярность и амплитуда которых определяются потенциальным рельефом, имевшимся на считываемом элементе экрана.

Так как после считывания информации с любого элемента на нем фактически записывается «0», то для возможностей многократного считывания записанной информации ее нужно после каждого считывания восстанавливать или регенерировать. Поэтому практически почти во всех ЗУ на электроннолучевых трубках луч после считывания не перемещается сразу на следующий запоминающий элемент, а остается на том же элементе на время, необходимое для того, чтобы считанный сигнал, после опознавания его в блоке регенерации, помимо выдачи на выход ЗУ, был использован для управления лучом с целью перезаписи считанной информации. Таким же методом осуществляется в промежутки времени между обращениями к ЗУ регенерация всей содержащейся в нем

информации путем последовательного считывания и перезаписи информации на всех элементах экрана.

Рассмотрим упрощенную блок-схему ЗУ на электроннолучевых трубках с поверхностным перераспределением зарядов (рис. 9-10) и опишем процесс записи, считывания и регенерации информации в этой системе. Как правило, ЗУ на электроннолучевых трубках строятся по принципу параллельного действия, когда все разряды числа, подлежащего хранению, записываются или считываются одновременно. При этом общее количество трубок в ЗУ равно числу разрядов фиксируемых чисел, а общая емкость ЗУ состав-

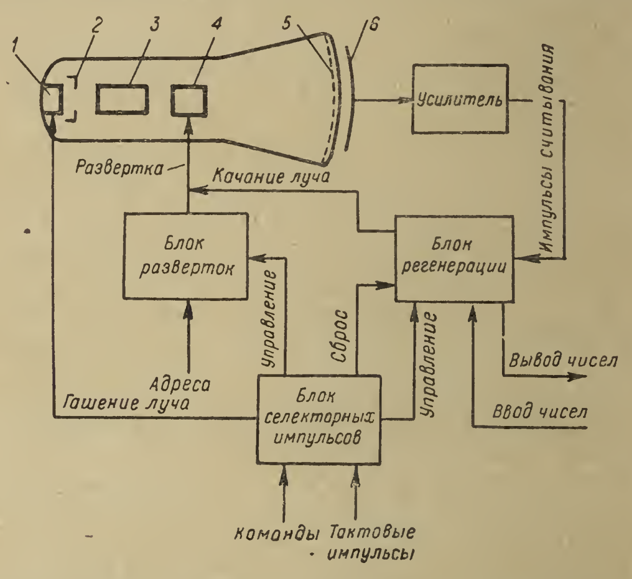


Рис. 9-10. Упрощенная блок-схема ЗУ на электроннолучевых трубках с поверхностным перераспределением зарядов.

1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — фокусирующие и ускоряющие аноды; 4 — отклоняющая система; 5 — экран; 6 — сигнальная пластина.

ляет столько чисел, на сколько элементов может быть разбит экран каждой трубки.

На описанном принципе было построено ЗУ разработанной в 1952 г. отечественной быстродействующей вычислительной машины М-2 [1-3]. В ее оперативном ЗУ использовались 34 обычных осциллографических трубки типа 13ЛО37 с 512 запоминающими элементами каждая и с надежностью, равной 170. Таким образом, общая емкость оперативного ЗУ машины составляла 512 34-разрядных чисел. В каждом разряде ЗУ, помимо трубки, имеется усилитель сигналов считывания и блок регенерации. Блок же управления (блок селекторных импульсов и блок раз-

верток) являются общими для всех разрядов ЗУ. Тактовая частота работы ЗУ до 2000 циклов в секунду.

Назначение и взаимодействие всех элементов блок-схемы, изображенной на рис. 7-18, следующее. Блок селекторных импульсов предназначается для управления работой всего ЗУ. При записи или чтении он выдает в блок разверток сигнал управления, обеспечивающий выбор лучом на экране элемента, соответствующего поступившему адресу. В течение же всего остального времени, свободного от записи и считывания информации, в блок разверток выдается сигнал, обеспечивающий режим регенерации, при котором луч на экране последовательно, элемент за элементом, обходит весь растр.

Чтобы избежать «размазывания» информации и появления ложных сигналов и помех при перемещении луча по экрану, на время перехода луча с одного элемента на другой луч гасится специальными положительными импульсами гашения, вырабатываемыми в блоке селекторных импульсов и подаваемыми одновременно на катоды всех трубок ЗУ.

Блок регенерации выполняет следующие функции. Через усилитель на него поступают снимаемые с сигнальной пластины импульсы считывания, а цепями «ввод чисел» и «вывод чисел» он связан с регистрами, из которых поступает подлежащая хранению и в которые выдается считанная информация. В соответствии с поступающими от усилителя импульсами считывания (при чтении и регенерации) или поступающими от регистра импульсами кода числа (при записи) и согласно поступающим от блока селекторных импульсов управляющим импульсам «запись», «регенерация» или «чтение» блок регенерации вырабатывает отклоняющие напряжения, обеспечивающие управление перемещением электронного луча в пределах избранного запоминающего элемента экрана. Таким образом осуществляется создание на данном элементе экрана определенного потенциального рисунка, соответствующего «0» или «1» записываемой вновь (при записи) или восстанавливаемой (при регенерации и чтении) информации.

Блок разверток служит для формирования отклоняющих напряжений, обеспечивающих направление электронного луча на любой из 512 запоминающих элементов поверхности экрана, расположенных в виде 16 строк по 32 элемента в каждой. Для этой цели фактически служат два блока разверток: блок строчной развертки, вырабатывающий периодическое напряжение 32-ступенчатой формы, которое подается на горизонтально-отклоняющие пластины, и блок кадровой развертки, вырабатывающий периодическое напряжение 16-ступенчатой формы, подаваемое на вертикально-отклоняющие пластины.

В описанных ЗУ повышению плотности записи, т. е. увеличению количества запоминающих элементов на экране, препятствует указанное ранее явление «забрызгивания». Поэтому в более поздних машинах, разрабатывавшихся в 1952—1955 гг., широкое

применение получили ЗУ на более совершенных электроннолучевых трубках с барьерной сеткой.

Электроннолучевые трубки с барьерной (тормозящей, задерживающей) сеткой, или, как их кратко называют, потенциалоскопы, были разработаны в лабораториях фирмы «RCA» (США). Технология изготовления этих трубок немногим сложнее, чем обычных осциллографических трубок. ЗУ на трубках с барьерной сеткой характеризуются относительно простыми схемами управления записью и считыванием, бо́льшим сигналом считывания и бо́льшей информационной емкостью, чем простые осциллографические трубки.

Основным признаком, отличающим потенциалоскопы в конструктивном отношении от обычных трубок, является наличие в непосредственной близости от экрана (на расстоянии порядка десятков — сотен микрон) мелкоструктурной барьерной сетки, резко снижающей эффект «забрызгивания» экрана вторичными электронами.

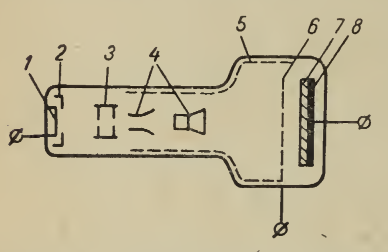


Рис. 9-11. Схематическое устройство электроннолучевой трубки типа потенциалоскопа.

1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — фокусирующие и ускоряющие аноды; 4 — отклоняющие пластины; 5 — коллектор; 6 — барьерная сетка; 7 — диэлектрический экран; 8 — сигнальная пластина.

На рис. 9-11 схематически показано устройство электроннолучевой трубки типа потенциалоскопа. Она состоит из трех частей: 1) обычного электронного прожектора (пушки), предназначенного для создания узкого пучка электронов и включающего катод, управляющий электрод и фокусирующие и ускоряющие аноды; 2) отклоняющей системы с двумя парами пластин и 3) части, предназначенной для записи и считывания информации, включающей экран, сигнальную пластину, барьерную сетку и коллектор.

Сигнальная пластина, монтируемая внутри трубки, выполняется из алюминия, на который нанесен слой окиси алюминия Al_2O_3, обладающий большим удельным сопротивлением, высокой диэлектрической прочностью и имеющий большой коэффициент вторичной эмиссии. Этот слой образует диэлектрический экран (мишень для электронов). В некоторых конструкциях трубок применяются слюдяные экраны.

Барьерная сетка, располагаемая на расстоянии 50—200 *мкм* от экрана, а иногда и примыкающая к нему вплотную, изготовляется из вольфрамовых проволочек диаметром 20—30 *мкм*, расположенных под прямыми углами на расстоянии 100—300 *мкм* одна от другой.

Коллектор может быть выполнен либо в виде специального электрода (сетки), либо в виде аквадагового покрытия поверхности баллона трубки.

В рассматриваемых запоминающих трубках находят применение два способа записи информации: изменением потенциала сигнальной пластины при неизменном потенциале барьерной сетки или изменением потенциала барьерной сетки при неизменном потенциале сигнальной пластины. В отечественных вычислительных машинах, имевших оперативные ЗУ на электроннолучевых трубках с барьерной сеткой, применялся первый способ записи (машины «Стрела» и БЭСМ-1).

Например, ЗУ машины БЭСМ-1 работало на потенциалоскопах с барьерной сеткой типа ЛН-1, имевших следующие основные характеристики:

1) количество ячеек записи на диэлектрическом экране — 1024 при 400 допустимых обращениях в соседние ячейки (из них по 100 записей и считываний «1» и по 100 записей и считываний «0»);

2) время перезаряда элемента потенциалоносителя — 5 *мксек*;

3) ток сигнала — около 10 *мка*;

4) чувствительность по отклонению луча — 0,35 *мм/в*.

При этом была достигнута максимальная рабочая частота около 80 *кгц*, что соответствует длительности одного цикла обращения около 12 *мксек*.

Позднее были разработаны модернизированные потенциалоскопы типа ЛН-4 с более толстым слоем диэлектрика. Применение этих потенциалоскопов позволило повысить быстродействие на 20—30% и вдвое увеличить емкость и надежность ЗУ, так как количество элементов записи на экране ЛН-4 равно 2048 при 800 допустимых обращениях. Наконец, еще позднее была создана трубка типа ЛН-8, обеспечивающая запоминание 4096 или 8192 двоичных цифр при количестве допустимых обращений соответственно около 4000 или 1000.

В лабораториях фирмы «Белл» (США) разработана экспериментальная трубка с емкостью в 16000 элементов на экране со временем обращения 1 *мксек* при 400 допустимых обращениях.

Одним из существенных недостатков описанных выше обоих типов ЗУ на электроннолучевых трубках обычного осциллографического типа и потенциалоскопах с барьерной сеткой является довольно быстрое растекание зарядов по поверхности диэлектрического экрана и связанная с этим необходимость несколько раз в секунду возобновлять на экране потенциальный рельеф, соответствующий зафиксированной информации.

В 1947—1950 гг. в лабораториях Массачусетского технологического института и Военно-морской исследовательской лаборатории (США) были разработаны специальные запоминающие трубки с мозаичной мишенью с так называемым фиксирующим или поддерживающим облучением. Существенным признаком этих трубок является наличие отдельного электронного прожектора, создающего рассеянный поток медленно летящих электронов, облучающий одновременно весь экран. Поддерживающее электронное

облучение обеспечивает сохранение информации и в то же время никак не участвует в процессах записи и чтения.

Во всех описанных выше запоминающих электроннолучевых трубках выбор определенного элемента экрана при записи и считывании осуществляется электронным лучом.

В лаборатории фирмы «RCA» (США) Райхманом была разработана трубка, получившая название селектрона, в которой используется принцип хранения информации, в значительной степени аналогичный применяемому в трубках с поддерживающим облучением. Однако способом считывания и особенно методом отыскания нужного элемента селектрон существенно отличается от всех ранее описанных типов запоминающих трубок. При этом за счет значительного усложнения конструкции трубки удается отказаться от отклонения электронного луча и тем самым упростить схему ЗУ и повысить надежность его действия. Для выбора заданного элемента экрана в селектроне используется решетка с квадратными отверстиями, образуемая двумя рядами взаимно перпедикулярных изолированных друг от друга селектирующих пластин.

Селектроны были выпущены в США небольшой серией и применялись в оперативных ЗУ, по крайней мере, двух вычислительных машин. Однако их широкому распространению, несмотря на существенные достоинства, препятствовала сложность их конструкции, высокая стоимость и большое потребление энергии, обусловленное большой рабочей поверхностью катодов.

Специфическим элементом схем ЗУ на всех описанных выше типах трубок, кроме селектрона, являются специальные устройства, позволяющие направлять электронный луч в заданную точку экрана.

Предназначенные для этой цели отклоняющие схемы, или, иначе, схемы установки лучей трубок, выполняют функции дешифраторов адреса. Их назначением является преобразование кода адреса в соответствующие ему отклоняющие напряжения, которые, будучи приложенными к вертикально- и горизонтально-отклоняющим пластинам трубки, направляют электронный луч в заданную точку экрана.

Таким образом, место экрана, в которое отклоняется электронный луч, определяется в основном величинами напряжений, приложенных к отклоняющим пластинам, т. е. количественным признаком. Это обстоятельство снижает надежность ЗУ с выбором элементов электронным лучом и делает его критичным к напряжению источников питания. Так, например, для трубок, работавших в машине БЭСМ-1, при диаметре луча $d = 0{,}7$ *мм* считался допустимым сдвиг центра луча относительно центра точечного запоминающего элемента при повторном попадании на $0{,}1\,d$, т. е. на 0,07 *мм*. При чувствительности трубки по отклоняющим пластинам 0,35 *мм/в* это соответствует изменению напряжения между отклоняющими пластинами $\Delta U = 0{,}2$ *в*.

Отсюда вытекает необходимость весьма жесткой стабилизации источников питания блока ЗУ. Правда, благодаря регенерации отпадает необходимость в очень точной длительной стабилизации питающего напряжения. При его медленных изменениях в некоторых допустимых пределах на экране трубки как бы «плывет» весь потенциальный рельеф без потерь информации. Важно лишь устранить резкие скачки напряжения, которые могут попасть в интервал времени между регенерациями и в результате вызвать обращение к ЗУ по неправильным адресам.

Фирмой «Белл» (США) разработана исключительно точная отклоняющая система, в которой используется принцип корректировки отклонения с помощью обратной связи по эталонному растру [9-14]. Эта система предназначается для преобразования в отклоняющие напряжения четырнадцатиразрядного двоичного адреса, чем обеспечивается выбор на экране электроннолучевой трубки с барьерной сеткой одного из 16384 (128×128) запоминающих элементов. При этом гарантируется коэффициент допустимых обращений (надежность) не менее 150.

В системе имеется устройство, запоминающее адрес предшествующей ячейки, к которой производилось обращение, и вырабатывающее отклоняющее напряжение, соответствующее разности предшествующего и заданного адресов. Далее выработанные напряжения обеспечивают одновременное отклонение лучей в запоминающих трубках и в специальной трубке с эталонным растром. Если луч неточно совпадает с заданным элементом эталонного растра, то специальная схема вырабатывает сигналы коррекции, которые по цепи обратной связи подаются в схему выработки отклоняющих напряжений и, таким образом, обеспечивают наводку луча на заданный элемент с точностью до 0,1%. Важным достоинством схемы наряду с большой точностью отклонения является также и ее быстродействие: полный цикл обращения укладывается в интервал времени не более 2,5 *мксек*.

ЗУ на электроннолучевых трубках, которые являлись основным видом оперативной памяти ЦВМ, выпускавшихся в 1948—1954 гг., почти повсеместно вытеснены более эффективными ЗУ на ферритовых сердечниках и других ферромагнитных элементах.

Однако в некоторых специфических устройствах, например, в ядерной электронике [1-26] и других специальных схемах, ЗУ на электроннолучевых трубках еще играют заметную роль. Следует отметить, что и в цифровой вычислительной технике они продолжают находить ограниченное применение. Например в [9-29] сообщалось, что разработанная в 1964 г. усовершенствованная вычислительная система «Филко-213» (США) снабжается памятью емкостью миллион 48-разрядных чисел на электростатических запоминающих трубках. Кроме того, малоинерционный принцип считывания лучом может в будущем найти широкое применение не только в электростатических ЗУ, но и в ЗУ с записью на магнитных носителях, фотоскопических и других типах ЗУ.

ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

10-1. Запоминающие устройства на транзисторных триггерах

Как уже указывалось в § 1-1, оперативные ЗУ первых электронных ЦВМ строились на ламповых триггерах, обеспечивавших вполне достаточное в то время быстродействие. Но так как для хранения каждого двоичного разряда необходим отдельный триггер, то уже при емкости даже порядка десятков или сотен многоразрядных чисел габариты ЗУ и потребление им энергии становятся практически неприемлемыми.

Появление в конце 40-х и в начале 50-х годов транзисторов позволило строить более экономичные триггеры, но так как к этому времени были созданы оперативные ЗУ на линиях задержки, электроннолучевых трубках, а затем и на ферритовых сердечниках, то по-прежнему относительно громоздкие, дорогие и неэкономичные запоминающие элементы на транзисторных триггерах находили применение лишь для построения регистров — запоминающих ячеек на одно число в арифметических устройствах, управляющих устройствах и других блоках ЦВМ.

Однако возникшая потребность наличия в составе ЗУ сверхоперативной памяти небольшой емкости с временем цикла порядка долей микросекунды, с одной стороны, и улучшение частотных характеристик и значительное уменьшение физических размеров транзисторов, с другой стороны, вновь возродили интерес к транзисторным триггерам, как запоминающим элементам.

Существенным обстоятельством является возможность построения на транзисторных триггерах ЗУ, в которое информация может поступать в виде относительно слабых сигналов, а считанные сигналы могут быть достаточно велики по амплитуде. Таким образом, в составе ЗУ могут отсутствовать мощные формирователи и усилители считывания, что при небольшой емкости ЗУ может успешно компенсировать относительно большие размеры запоминающих элементов и необходимость непрерывного расхода энергии для сохранения информации.

Однако особенно многообещающим является применение ЗУ на транзисторных триггерах в интегральном исполнении. При этом не только во много раз уменьшаются габариты ЗУ и потребление энергии, но и значительно возрастает надежность. По данным [10-7], полупроводниковая интегральная схема, содержащая несколько десятков элементов обладает примерно такой же надежностью, что и один полупроводниковый прибор дискретного типа. Достигается это благодаря созданию в полупроводниковом

кристалле комплексных микроминиатюрных многокомпонентных структур и отсутствию внутри этих структур таких ненадежных элементов, как пайки.

За последние годы создан ряд макетов ЗУ на полупроводниковых транзисторах в интегральном исполнении [10-12, 10-21, 10-24]. На рис. 10-1 показана, например, схема простейшего запоминающего элемента на триггере с непосредственными связями на транзисторах T_1 и T_2. Состоянием триггера определяется потенциал относительно земли точки, которая связана с числовой и разрядной шинами двухмерного ЗУ через элемент связи на ключевом транзисторе T_3. Как видно из рисунка, запоминающий элемент содержит три транзистора и четыре резистора, т. е. всего семь компонентов. В работе [10-24] описана пластинка матрицы такого ЗУ емкостью 16 *бит* с размерами 1,8×1,9 *мм*. На такой пластинке размещено 112 компонентов и рассеивается мощность 192 *мвт*.

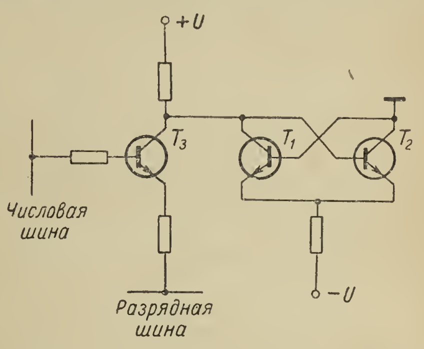


Рис. 10-1. Запоминающий элемент на триггере с непосредственными связями.

В серии ЦВМ «Сигма-7» фирмы «CDC» (США) [10-16] применяется четыре буферных ЗУ емкостью несколько сот бит каждое, построенных на интегральных схемах. Одна плата этого ЗУ, на которой размещается 16 интегральных модулей с восемью триггерами и вспомогательными схемами каждый, представляет собой запоминающий блок емкостью 16 *байт* (1 *байт* = 8 *бит*). Среднее время записи числа в этом ЗУ — 90 *нсек*, время считывания — 60 *нсек*.

Для того чтобы экономить мощность питания, в схемах буферного ЗУ применено оригинальное решение — триггеры, которые в данный промежуток времени не хранят информации, обесточиваются. Это осуществляется за счет потенциала от одного из разрядов адреса в качестве управляющего сигнала, который переключает транзистор, в свою очередь обесточивающий неработающие триггеры. Таким образом удается сэкономить до 60% мощности, затрачиваемой в ЗУ.

В ряде случаев сверхоперативные полупроводниковые ЗУ строятся на триггерах, в качестве элементов которых используются разработанные за последние годы новые виды транзисторов. Разработаны, например, запоминающие элементы и макеты ЗУ на двухэмиттерных транзисторах [10-33], на управляемых четырехслойных диодах [10-25] и ряд других. Особенно большие надежды возлагаются на схемы и конструкции ЗУ на так называемых металло-оксидных транзисторах.

10-2. Запоминающие устройства на металло-оксидных транзисторах (МОП транзисторах)

Полевые (канальные) транзисторы типа металл-окисел-полупроводник или, как их еще называют, МОП транзисторы (МОП унитроны) [10-18] основаны на модуляции поперечным электрическим полем поверхностного слоя полупроводника на границе между полупроводником и диэлектриком. У МОП транзистора переход заменен окисным слоем, на котором размещен металлический управляющий электрод (рис. 10-2, *а*). МОП транзисторы, созданные методом диффузии, могут иметь расстояние между истоком и стоком порядка десятков микрон, толщина окисной пленки над каналом — около 0,1 *мкм*. В переключающих схемах, регистрах, запоминающих элементах получили применение так называемые МОП транзисторы с индуцированным каналом, условное обозначение которых приведено на рис. 10-2, *б*.

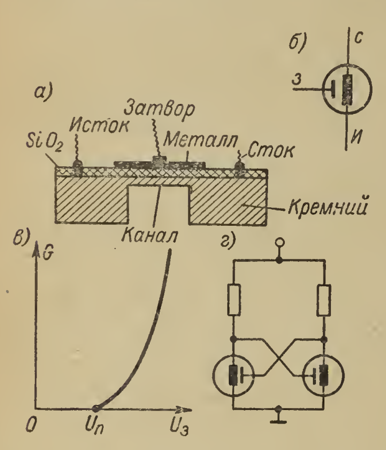


Рис. 10-2. МОП транзистор: *а* — поперечный разрез; *б* — условное обозначение; *в* — характеристика; *г* — триггер на МОП транзисторах.

Зависимость проводимости одной из модификаций МОП транзистора с индуцированным каналом G от напряжения на затворе $U_з$ представлена на рис. 10-2, *в*. При отсутствии напряжения на затворе или при величине его меньше некоторого порогового значения $U_п$ ток истока составляет всего несколько наноампер. Если же напряжение на затворе превысит пороговое значение, то ток истока может достигнуть величины порядка 10 *ма*. Величина порогового напряжения, которая зависит от типа МОП транзистора, толщины окиси над каналом, состояния поверхности и проводимости основного кристалла, составляет несколько вольт или долей вольта. Высокое входное сопротивление МОП транзисторов, достигающее при нулевом потенциале затвора до 10^{15} *ом*, позволяет собирать на них схемы с непосредственными связями.

Триггер с непосредственными связями на МОП транзисторах представлен на рис. 10-2, *г*. В этой схеме любой из транзисторов будет закрыт, если напряжение на его затворе, равное напряжению на стоке другого транзистора, будет меньше или равно пороговому напряжению. Анализ устойчивости, быстродействия и прочих характеристик триггеров и других схем на МОП транзисторах содержится в работе [10-6].

На рис. 10-3, *а* показана схема подключения запоминающего элемента на МОП транзисторах к шинам в двухмерном ЗУ [10-31]. Элемент представляет собой описанный выше триггер с непосредственными связями на транзисторах T_1 и T_2 и два дополнительных МОП транзистора T_3 и T_4 для управления функциями записи и считывания. Для ускорения записи соответствующие импульсы напряжения подводят одновременно к двум узловым точкам триггера.

Запись «0» или «1» осуществляется, как это видно из временных диаграмм рис. 10-3, *б*, понижением до нуля постоянного потенциала соответствующей разрядной шины при одновременном возбуждении положительным импульсом числовой шины. При этом потенциал одной из узловых точек триггера через ключ T_3 или T_4 понижается до нуля, благодаря чему другой транзистор триггера запирается. Если он уже был заперт, то никаких изменений в схеме триггера не происходит.

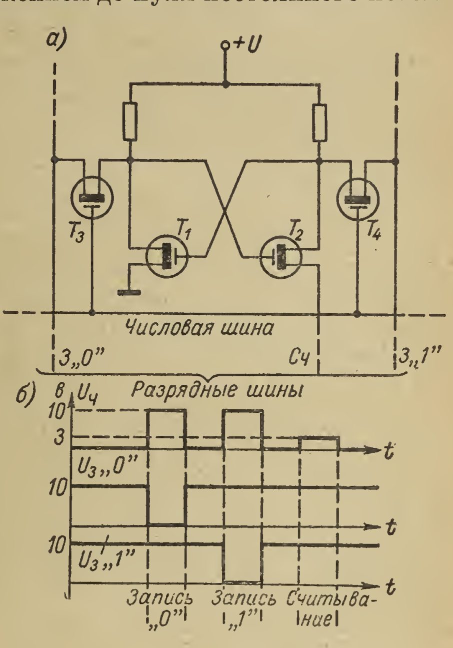


Рис. 10-3. Запоминающий элемент на МОП транзисторах: *а* — схема включения в матрицу двухмерного ЗУ; *б* — временные диаграммы.

Считывание осуществляется открыванием обоих ключей T_3 и T_4 импульсом небольшой амплитуды, подаваемым в числовую шину. При этом в зависимости от состояния триггера в разрядной шине считывания возникает соответствующий импульс. Подбирая надлежащим образом амплитуду считывания в числовой шине (в данном случае 3 *в*), удается сохранить неизменное состояние триггера, т. е. осуществлять неразрушающее считывание.

Таким образом, в данной схеме матрица ЗУ образуется числовыми шинами (по одной на каждое число) и разрядными шинами (по три на каждый разряд). В другом варианте подобного ЗУ специальная разрядная шина считывания отсутствует, а сигналы считывания снимаются с соответствующих разрядных шин записи «0» или «1». Однако, хотя при этом уменьшается количество разрядных шин, сигналы записи воздействуют на входы усилителей считывания. Это требует так называемого бланкирования (запирания) усилителей. Кроме того, при совмещении разрядными шинами функций записи и считывания в них значительно возрастают

помехи при считывании за счет непосредственной емкостной связи между числовой и разрядными шинами через емкость затвор — сток ключевых транзисторов T_3 и T_4. Поэтому предпочтительнее применять рассмотренную схему с отдельной разрядной шиной считывания.

На рассмотренных элементах был спроектирован и испытан макет ЗУ емкостью 128 64-разрядных чисел. Это ЗУ проектировалось с таким расчетом, чтобы оно сопрягалось со стандартными логическими схемами на токовых переключателях в интегральном исполнении. Сигналы считывания из ЗУ составляют ±2 *в*. Общая мощность, потребляемая ЗУ, равна 43,5 *вт*. Время считывания составляет 35 *нсек*, время записи — 60 *нсек*.

Описан и ряд других макетов и проектов ЗУ на МОП транзисторах, в частности ЗУ емкостью 40960 *бит* на 388 интегральных платах (в том числе 320 плат, каждая из которых содержит 128 триггерных запоминающих элементов, работающих на девяти МОП транзисторах). Длительность цикла такого ЗУ должна составлять около 200 *нсек* [10-30].

Весьма перспективными представляются разработанные недавно интегральные схемы, построенные на парах МОП транзисторов с противоположными типами проводимости (*n* и *p*) [10-20]. Эти схемы получили название схем с дополнительными транзисторами или с дополнительной симметрией.

Мощность в этих схемах расходуется практически только во время переключения. При отсутствии же сигнала рассеяние мощности практически ничтожно (около 10 *нвт*), что является их важным достоинством. Измерения показали, что время переключения такой схемы составляет около 25 *нсек*, что позволяет в принципе строить на них ЗУ с циклом порядка 50 *нсек*.

В работе [10-34] высказывается мнение, что в следующем десятилетии сверхбыстродействующие буферные ЗУ емкостью 100—1000 чисел будут строиться в основном на МОП транзисторах.

10-3. Запоминающие устройства на туннельных диодах

Большие перспективы развития техники сверхбыстродействующих электронных цифровых машин сулит применение в их схемах туннельных диодов. В частности, на туннельных диодах могут строиться сверхоперативные ЗУ с циклом обращения порядка десятков и даже единиц наносекунд.

Туннельный диод был изобретен в 1958 г. японским ученым Эсаки. В основе действия туннельного диода лежит туннельный эффект, состоящий в том, что благодаря волновым свойствам материи электроны могут проникать через потенциальные барьеры, непроницаемые для обычных частиц.

Вследствие туннельного эффекта при нарастании напряженности поля в пределах 10^5—10^6 *в/см* в диоде происходит резкий

пробой. Он наблюдается во всей области отрицательных напряжений и на определенном участке положительных напряжений, приложенных к диоду. На рис. 10-4 изображена вольт-амперная характеристика германиевого туннельного диода, снятая на постоянном токе.

В настоящее время для изготовления туннельных диодов широко используются также кремний и арсенид галлия.

При достаточно большой площади максимальный ток в опытных образцах германиевых туннельных диодов достигал нескольких ампер, а в кремниевых — до ампера при напряжениях порядка долей вольта. Тепловые потери в туннельных диодах весьма незначительны.

Важное свойство туннельных диодов заключается в весьма широком диапазоне температур, в котором сохраняется падающий участок их вольт-амперной характеристики. При экспериментах с кремниевыми диодами установлено, что у них этот участок сохранялся в пределах от 4,2° K (температура жидкого гелия) до 350—375° C. Германиевые туннельные диоды нормально работают в интервале температур от —160 до +140° C, а некоторые диоды из арсенида галлия могут работать при температуре до +300° C.

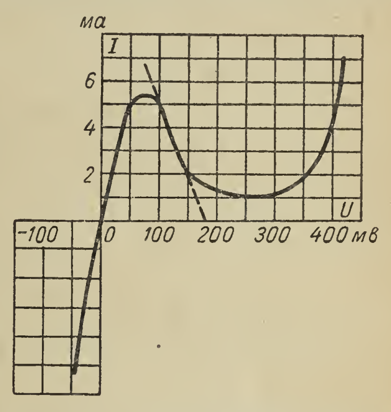


Рис. 10-4. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

Наконец, выявлена высокая устойчивость работы туннельных диодов при радиоактивном облучении. Это позволяет применять их для повышения надежности электронных устройств специального назначения.

Возможность построения запоминающих элементов на туннельных диодах основана на их свойстве работать в режиме триггера и сохранять одно из двух устойчивых состояний. Рассмотрим этот режим работы.

На рис. 10-5, *а* изображена схема включения диода в режиме триггера, а на рис. 10-5, *б* приведен график, характеризующий зависимость между токами и напряжениями в схеме.

Напряжение U на диоде относительно «земли» при напряжении источника смещения U_0 и токе I в цепи, включающей этот источник, диод и постоянное сопротивление R, будет

$$U = U_0 - IR,$$

откуда

$$I = \frac{1}{R} U_0 - \frac{1}{R} U.$$

Это выражение представляет собой уравнение прямой, отсекающей на осях абсцисс и ординат соответственно отрезки $U = U_0$ и $I = U_0/R$, а точки пересечения *а*, *б* и *в* этой прямой с вольт-амперной характеристикой диода являются точками, характеризующими одно из трех возможных состояний данной схемы.

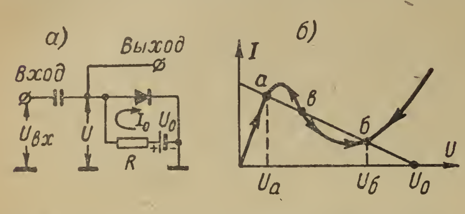


Рис. 10-5. Схема использования туннельного диода в режиме переключения (*а*) и график зависимости между напряжением и током в этой схеме (*б*).

Однако, если проанализировать процессы в схеме, то можно убедиться, что только два из трех возможных состояний схемы устойчивы, а именно, состояния, характеризующиеся точками *а* и *б*. В самом деле, если схема находится в состоянии, соответствующем точке *в*, то любое изменение тока в ней будет вызывать изменение напряжения, способствующее изменению тока в том же направлении, и схема перейдет либо в устойчивое состояние *а*, когда начальным толчком было увеличение тока I или уменьшение напряжения U, либо в устойчивое состояние *б*, когда начальным толчком было уменьшение тока I или увеличение напряжения U.

Рассмотрим временны́е диаграммы работы описываемой схемы, приведенные на рис. 10-6. Пусть начальное состояние схемы характеризуется точкой *а* (рис. 10-5, *б*). При этом на выходе схемы имеется малое напряжение $U_а$. В момент времени t_1 на вход схемы поступает положительный импульс, который перебрасывает схему во второе устойчивое состояние, характеризующееся точкой *б*. При этом напряжение на выходе схемы достигнет бо́льшей величины $U_б$, и это новое состояние схемы будет сохраняться до тех пор, пока в некоторый момент времени t_2 на вход не поступит отрицательный импульс, возвращающий схему в начальное состояние. Приписывая одному из устойчивых состояний, например, состоянию, соответствующему $U_а$, значение «0», а другому состоянию, соответствующему $U_б$, — значение «1», можно использовать рассмотренную схему в качестве запоминающего элемента. Время срабатывания триггера на туннельном диоде — порядка десятков или даже единиц наносекунд.

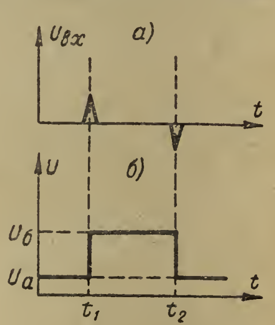
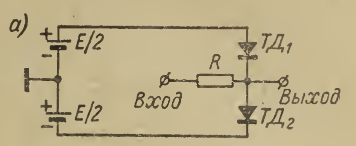


Рис. 10-6. Временны́е диаграммы работы туннельного диода в режиме переключения: *а* — сигнал на входе; *б* — сигнал на выходе.

Более надежна схема триггера на двух диодах, получившая название «пара» или «твин». Схема твина изображена на рис. 10-7, *а*,

а соответствующие ей вольт-амперные характеристики — на рис. 10-7, *б*. В этой схеме можно считать, что один из диодов, например $ТД_2$, служит сопротивлением нагрузки для диода $ТД_1$.



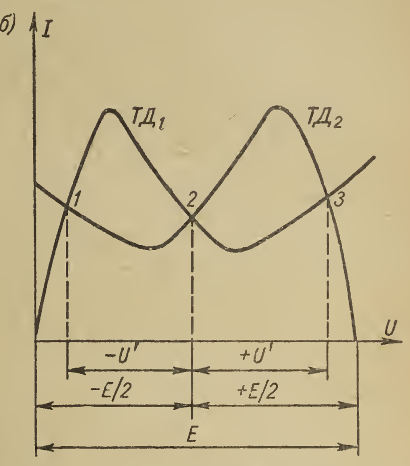


Рис. 10-7. Схема запоминающего элемента на двух диодах — твина (*а*) и вольт-амперная характеристика твина (*б*).

Если построить две вольт-амперные характеристики для диодов $ТД_1$ и $ТД_2$ (рис. 10-7, *б*), то три точки их пересечения будут соответствовать трем состояниям равновесия схемы. При этом состояния, соответствующие точкам *1* и *3*, устойчивы, а состояние *2* — неустойчиво. Устойчивому состоянию *1* соответствует напряжение на выходе $-U'$, а состоянию *3* — напряжение на выходе $+U'$.

Схема двухмерного ЗУ, построенного на твинах, приведена на рис. 10-8. Здесь шины X_1Y_1, X_2Y_2, ..., X_mY_m выполняют функции селектирующих шин для выбора нужной числовой линейки. Шины *1*, *2*, ..., *n* выполняют функции разрядных проводников, используемых как для записи, так и для считывания информации. При считывании информации на выходах этих шин появляются импульсы различной полярности, в зависимости от того, была ли в опрашиваемом элементе записана «1» или «0». Аналогично и запись в некотором элементе выбранной числовой линейки «1» или «0» осуществляется подачей в разрядную шину импульса той или иной полярности.

Рис. 10-8. Схема двухмерного ЗУ на твинах.

Разрядные шины соединены со средними точками диодных пар запоминающих элементов через элементы развязки, состоящие из активного сопротивления и конденсатора. В качестве элементов развязки могут быть более

эффективно применены нелинейные элементы — точечные или туннельные диоды, а также специальные обращенные туннельные диоды.

В заключение перечислим несколько разработок ЗУ на туннельных диодах. В Японии в 1965 г. построено ЗУ на туннельных диодах с циклом менее 50 *нсек* [10-10]. Фирмой «Плесси» (Англия) разрабатывается ЗУ емкостью 64 32-разрядных числа с циклом 120 *нсек* [10-28]. Наиболее быстродействующее ЗУ на туннельных диодах разработано фирмой «IBM» (США). Длительность цикла в этом устройстве является рекордной по сравнению с достигнутыми в каких-либо других разработках ЗУ и составляет 25 *нсек* [10-27]. Учитывая высокую стоимость ЗУ на туннельных диодах, в современных разработках уделяется большое внимание методам их изготовления. Так, в [10-32] описана планарная технология туннельных диодов, в результате применения которой получаются приборы с небольшим разбросом характеристик. На таких туннельных диодах строится сверхбыстродействующее ЗУ с неразрушающим считыванием информации.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ (КРИОГЕННЫЕ) ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

11-1. Краткие сведения о сверхпроводимости

Первая попытка использования явления сверхпроводимости для создания элементов вычислительной техники относится к 1955 г., когда в Массачусетском технологическом институте (США) был создан сверхпроводящий прибор — криотрон, в котором используется возможность управления состоянием проводимости с помощью магнитного поля [11-23]. С тех пор разработан и исследован ряд различных сверхпроводящих приборов, предназначенных для работы в логических схемах и ЗУ быстродействующих вычислительных машин. Эти приборы получили наименование *криогенных* приборов (от греческого слова «криос» — холод), так как они работают в условиях глубокого охлаждения, при температурах, близких к абсолютному нулю.

Явление сверхпроводимости [11-5, 11-20] заключается в исчезновении электрического сопротивления у металлов при охлаждении их ниже предельной, так называемой критической температуры. Это явление было открыто в 1911 г. голландским физиком Каммерлинг-Оннесом, который обнаружил, что при охлаждении ртути до 4,12° К ее сопротивление внезапно, скачком, падало до такой малой величины, что не могло быть измерено даже самыми чувствительными методами.

Наиболее строгая и полная теория сверхпроводимости была разработана в 1957 г. акад. Н. Н. Боголюбовым и его сотрудниками. Им удалось установить аналогию между явлениями сверхпроводимости и сверхтекучести и доказать, что сверхпроводимость не что иное, как сверхтекучесть электронов в металле.

Интересно отметить, что сверхпроводимость обнаруживается при охлаждении металлов, которые в нормальных условиях являются не очень хорошими проводниками, в то время как, например, медь, серебро и золото в сверхпроводящее состояние не переходят.

Ниже приведены критические температуры, при которых возникает явление сверхпроводимости, для некоторых металлов:

Ниобий	8	Олово	3,7
Свинец	7,3	Алюминий	1,2
Тантал	4,4	Индий	3,4
Ртуть	4,1	Кадмий	0,6

Однако и при температуре ниже критической состояние сверхпроводимости может быть разрушено внешним магнитным полем, если его напряжение достигнет некоторой достаточной величины $H_к$, называемой критическим, или пороговым магнитным полем. Зависимость $H_к$ от температуры достаточно точно выражается формулой:

$$H_к = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_к}\right)^2\right], \quad (11\text{-}1)$$

где H_0 — характеристика данного сверхпроводника.

Для чистых металлов H_0 изменяется от 2060 *а/см* для ниобия, до 22,5 *а/см* для кадмия, причем обычно чем выше температура $T_к$, тем больше и значение H_0.

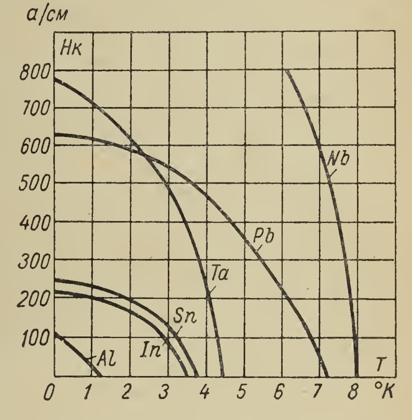


Рис. 11-1. Зависимость порогового магнитного поля от температуры для некоторых сверхпроводников.

На рис. 11-1 приведена зависимость критического магнитного поля $H_к$ от температуры T для некоторых сверхпроводников. Для каждого из металлов, представленных этими кривыми, все точки плоскости, расположенные слева от соответствующей кривой, принадлежат к области сверхпроводимости, а все точки справа от кривой — к области нормального сопротивления проводника.

11-2. Криотроны и запоминающие элементы на них

Рассмотренные выше свойства сверхпроводников положены в основу действия сверхпроводникового элемента ключевого действия — *криотрона*. Простейший криотрон, описанный Баком

[11-23] (рис. 11-2, *а*), представляет собой танталовый стержень длиной около 25 *мм* и диаметром около 0,25 *мм*. На него намотана однослойная обмотка, состоящая из 250 витков изолированной ниобиевой проволоки диаметром примерно 0,08 *мм*. Прибор помещается в криостат, в котором при помощи жидкого гелия поддерживается температура 4,2° К. При такой температуре и тантал и ниобий находятся в состоянии сверхпроводимости.

Однако если пропустить по обмотке ток порядка 300 *ма*, который при выбранном числе витков создает магнитное поле напряженностью около 32 *а/см*, то тантал скачком перейдет из состояния сверхпроводимости в состояние нормальной проводимости. При этом сопротивление танталового стержня мгновенно изменится от нуля до некоторой конечной величины. Таким образом, танталовый стержень криотрона как бы аналогичен промежутку анод-катод тиратрона, а управляющая обмотка его играет роль, аналогичную роли управляющей сетки, с той только разницей, что в тиратроне сетка управляет лишь моментом его зажигания, а в криотроне прекращение тока в обмотке восстанавливает его начальное сверхпроводящее состояние.

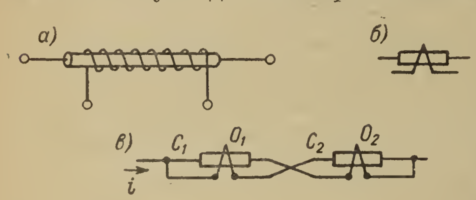


Рис. 11-2. Схематическое устройство криотрона и криотронного триггера: *а* — криотрон; *б* — схемное обозначение криотрона; *в* — триггер на двух криотронах.

В отличие от тиратрона направление токов в обеих цепях криотрона никак не влияет на его работу. Криотрон, стержень которого включен в какую-либо электрическую цепь, обладающую ничтожно малым сопротивлением, может действовать как реле. Пока стержень находится в сверхпроводящем состоянии, в цепи при ничтожно малом приложенном напряжении будет протекать достаточно большой по величине ток. При переходе стержня в состояние нормальной проводимости ток в цепи будет резко снижаться. В таком применении обмотка криотрона может быть выполнена из любого металла. Однако в большинстве случаев применение криотрона мыслится в качестве элемента криотронного триггера, когда управляющая обмотка одного криотрона соединена последовательно с танталовым стержнем другого криотрона. При этом сопротивление обмотки должно всегда оставаться равным нулю, т. е. независимо от величины изменяющегося в определенных пределах магнитного поля обмотка должна оставаться в сверхпроводящем состоянии. Этим и объясняется выбор в качестве материала обмотки ниобия, характеризующегося большой критической температурой, равной 8° К, и весьма большим критическим полем при рабочей температуре 4,2° К.

Для того чтобы один криотрон мог управлять таким же другим криотроном, необходимо также, чтобы при пропускании по

стержню тока i, равного току в обмотке, создающему критическое поле, сверхпроводимость в стержне не разрушалась.

Напряженность поля, создаваемая током i, протекающим по цилиндрическому проводнику диаметром d, равна у его поверхности $4i/d$. Напряженность же поля, создаваемого тем же током, протекающим по управляющей обмотке, содержащей n витков на 1 *см*, равна $4\pi ni$. Таким образом, для соблюдения поставленного условия необходимо, чтобы выполнялось неравенство $4\pi ni > 4i/d$, или $\pi nd > 1$.

Величина πnd, представляющая собой отношение поля управляющей обмотки к собственному полю стержня, обтекаемого током такой же величины, как и в обмотке, носит название коэффициента усиления криотрона по току. Этот коэффициент для криотрона описанной конструкции равен около семи.

На рис. 11-2, *б* показано рекомендуемое схемное обозначение криотрона, а на рис. 11-2, *в* — схема простейшего элемента с двумя устойчивыми состояниями, собранного на двух криотронах.

Как видно из схемы, здесь для тока имеются два параллельных пути, каждый из которых включает обмотку одного и стержень другого криотрона. Так как оба криотрона находятся в криостате и, следовательно, их стержни и обмотки обладают нулевым сопротивлением, то, казалось бы, и токи в обеих параллельных ветвях должны быть одинаковы. Однако, если ток в одной из ветвей, например в ветви, состоящей из обмотки первого криотрона O_1 и стержня второго криотрона C_2, достигнет критической величины, то магнитным полем первой обмотки разрушится сверхпроводимость стержня C_1, сопротивление этой ветви станет конечным и практически весь ток будет протекать по первой ветви $O_1 - C_2$. Это неравновесное состояние устойчиво и будет сохраняться при включенном питании сколь угодно долго. Равным образом возможно второе устойчивое неравновесное состояние, когда весь ток протекает по ветви $C_1 - O_2$, а сопротивление ветви $O_1 - C_2$ конечно, так как ток обмотки O_2 разрушает сверхпроводимость стержня C_2.

Для переброски триггера в новое устойчивое состояние нужно тем или иным способом разрушить сверхпроводимость одного стержня и перевести в сверхпроводящее состояние другой стержень. При этом происходит перераспределение токов в цепях триггера, которое устойчиво сохраняется до нового внешнего воздействия.

Однако криотрон описанной конструкции явно нетехнологичен, прежде всего из-за наличия многовитковой обмотки, и по той же причине обладает большой индуктивностью, а значит, и большой постоянной времени L/R.

Проблема быстродействия и технологичности криотронов в значительной степени разрешилась при переходе к тонкопленочным конструкциям. Пленочные криотроны, обладая ничтожно малой индуктивностью и относительно большим сопротивлением,

переключаются за время порядка микросекунд и менее. Их конструкция позволяет применять интегральную технологию изготовления при относительно низкой стоимости устройств. Поскольку сверхпроводимость относительно мало зависит от свойств пленки и ее дефектов, то имеется принципиальная возможность изготовления ЗУ с высокой степенью интегральности. Наконец, небольшие размеры криогенных запоминающих элементов обеспечивают высокую удельную плотность устройств хранения.

По своему конструктивному выполнению простейшие пленочные криотроны делятся на крестообразные (рис. 11-3, *а*) и линейные (рис. 11-3, *б*) [11-28]. На рис. 11-3, *в* показано условное схемное обозначение пленочного криотрона.

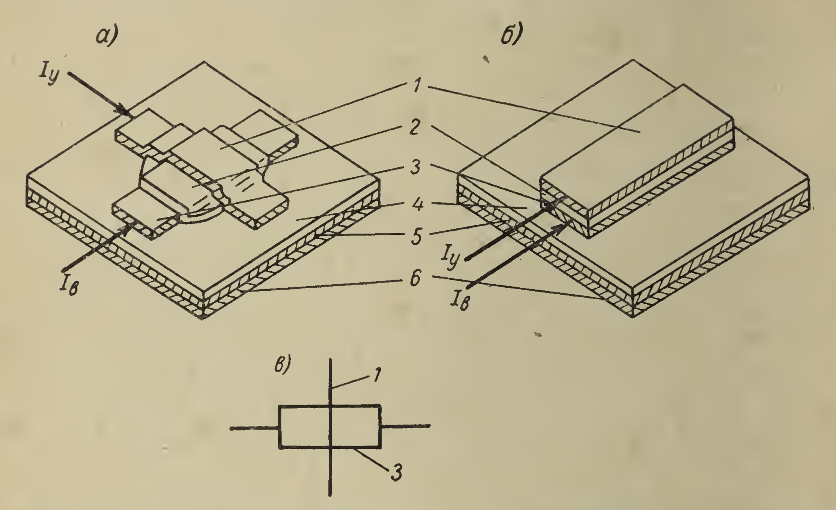


Рис. 11-3. Пленочные криотроны: *а* — крестообразный; *б* — линейный; *в* — схемное условное обозначение.

1 — управляющая пленка (Pb); *2* — изолирующий слой (SiO_2); *3* — вентильная пленка (Sn); *4* — изоляция (SiO_2); *5* — экранирующий подслой (Pb); *6* — подложка.

В обеих модификациях пленочные криотроны содержат два изолированных пленочных слоя, выполненных из сверхпроводниковых металлов с различными значениями критических параметров. Как правило, слой, по которому протекает управляемый ток $I_в$ (вентильный слой), напыляется из олова ($T_к = 3{,}7°$ K), а управляющий слой, по которому протекает управляющий ток $I_у$, напыляется из свинца ($T_к = 7{,}3°$ K). Рабочая температура криотрона несколько ниже 3,7° K, так что оба слоя находятся в сверхпроводящем состоянии.

Если управляющий ток $I_у$ превысит некоторое критическое значение, то под влиянием его магнитного поля оловянный вентильный слой перейдет в состояние нормальной проводимости, тогда как свинцовая управляющая пленка останется в сверхпро-

водящем состоянии. Таким образом, пленочный криотрон работает в принципе так же, как и описанный выше криотрон Бака.

Время перехода из сверхпроводящего состояния в состояние нормальной проводимости самого пленочного слоя измеряется единицами наносекунд. Во всяком случае, это время значительно меньше замедления, которое определяется постоянной времени всего прибора L/R. Для уменьшения индуктивности сверхпроводящие перемычки в криотроне напыляются на отделенный от них слоем изоляции сверхпроводящий, например, свинцовый экран.

Для современных пленочных криотронов время переключения составляет величину порядка сотен наносекунд. Так как у линейного криотрона активное сопротивление в процессе переключения значительно больше [11-22], то время его переключения может быть сделано на порядок меньше, чем у крестообразного криотрона. Недостатками линейного криотрона по сравнению с крестообразным является более сильная индуктивная связь между пленочными слоями (шинами) и технологические трудности, связанные с тем, что обе шины должны быть расположены точно одна над другой.

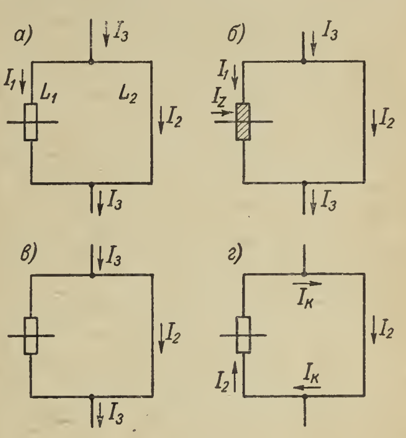


Рис. 11-4. Схема и принцип действия однокриотронного запоминающего элемента.

Предложен ряд принципиальных схем запоминающих элементов, построенных на криотронах. Наибольшую известность получили схемы на трех, двух и одном криотроне. Трехкриотронные элементы, впервые предложенные Хейнсом [11-30], позволяют осуществлять неразрушающее считывание информации. По такому принципу построены элементы ЗУ в макете ЦВМ на проволочных криотронах [11-10].

Однако недостатком трехкриотронных элементов является относительно низкая удельная плотность компоновки, составляющая при современной технологии около 180 *бит/см²*.

Тем же недостатком обладают и двухкриотронные элементы, которые к тому же не допускают неразрушающего считывания информации.

Наиболее перспективными можно считать однокриотронные запоминающие элементы, принцип работы которых мы и рассмотрим. Каждый запоминающий элемент состоит из замкнутого сверхпроводникового контура, включающего в себя вентильный слой криотрона. Управление состоянием криотрона осуществляется токами в числовом проводе I_z и в разрядном проводе $I_з$ (рис. 11-4). В отличие от триггера на криотронах, описанного ранее (рис. 11-2),

хранение информации в котором требует непрерывной подачи тока от внешнего источника, рассматриваемый запоминающий элемент потребляет энергию извне только в момент записи или считывания информации.

Запись информации в запоминающий элемент осуществляется в четыре этапа.

1. Ток записи, поступающий из разрядного провода $I_з$, разветвляется в сверхпроводящем контуре приблизительно обратно пропорционально индуктивностям ветвей L_1 и L_2 (рис. 11-4, *а*):

$$I_1 = I_з \frac{L_2}{L_1 + L_2}; \qquad I_2 = I_з \frac{L_1}{L_1 + L_2}.$$

2. Если теперь под воздействием управляющего числового тока I_z вентильный слой криотрона перейдет в состояние нормальной проводимости (рис. 11-4, *б*), то весь ток записи $I_з$ потечет через сверхпроводящую ветвь:

$$I_1 = 0; \qquad I_2 = I_з.$$

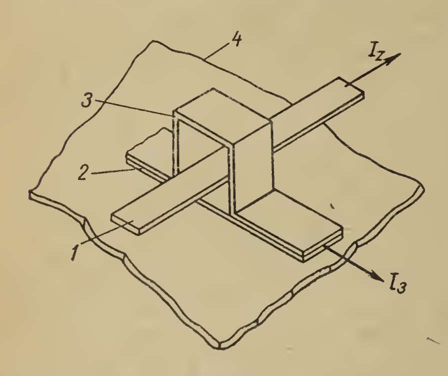


Рис. 11-5. Мостиковый запоминающий элемент.

1 — управляющий проводник (Pb); *2* — управляемый проводник (Sn); *3* — мостик (Pb); *4* — сверхпроводниковый экранирующий слой.

3. После прекращения действия числового тока I_z криотрон снова перейдет в сверхпроводящее состояние (рис. 11-4, *в*). Однако весь ток $I_з$ по-прежнему будет протекать по правой ветви, так как в соответствии с законом сохранения потока магнитный поток, охватываемый сверхпроводящим контуром, измениться не может. Таким образом, токи в ветвях контура сохраняют значения:

$$I_1 = 0; \qquad I_2 = I_з.$$

4. После выключения разрядного тока записи (рис. 11-4, *г*) в контуре возникает и в дальнейшем сохраняется персистирующий (непрерывно протекающий) ток $I_к$, который поддерживает магнитный поток:

$$I_1 = -I_к = -I_з \frac{L_2}{L_1 + L_2};$$

$$I_2 = I_к = I_з \frac{L_2}{L_1 + L_2}.$$

Для считывания информации в числовой провод подается импульс тока, который вновь переводит вентиль криотрона в состояние нормальной проводимости. При этом ток $I_к$ быстро затухает, создаваемый им магнитный поток исчезает, и индуктированная при этом э. д. с. воспринимается разрядным проводником как сигнал считывания.

Для уменьшения площади поверхности, занимаемой криотроном, предложена такая его конструкция, при которой правая ветвь сверхпроводящего контура (рис. 11-4) транспонируется в мостообразную перемычку (рис. 11-5), в результате чего получается так называемый *мостиковый* запоминающий элемент.

По предварительной оценке поверхностная плотность размещения мостиковых криотронных запоминающих элементов может достичь 4400 элементов на квадратный сантиметр [11-33].

11-3. Запоминающие элементы на непрерывных сверхпроводящих пленках

Использование для хранения информации непрерывных сверхпроводящих пленок впервые было предложено в 1960 г. [11-24].

Запоминающий элемент на непрерывной пленке изображен на рис. 11-6. Он образуется в месте пересечения под прямым углом управляющих проводников из свинца, расположенных на однородной сверхпроводящей оловянной пленке. Под ней расположены диагональный проводник считывания из свинца, являющийся общим для всех запоминающих элементов матрицы. Информация хранится в элементе в виде магнитного потока, направлением которого определяется ее логическое содержание («1» или «0»).

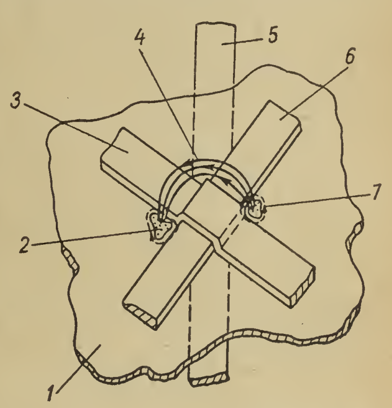


Рис. 11-6. Запоминающий элемент на непрерывной сверхпроводящей пленке.

1 — накопительная пленка (Sn); *2* — область с нормальной проводимостью; *3* — управляющий проводник *X* (Pb); *4* — захваченный магнитный поток; *5* — проводник считывания (Pb); *6* — управляющий проводник *Y* (Pb); *7* — персистирующий ток.

Упрощенно работу этого элемента можно описать следующим образом (рис. 11-7) [11-26, 11-29]. Пропустим по обоим пересекающимся проводникам токи, причем магнитное поле в месте пересечения будет естественно больше, чем под отдельным проводником (рис. 11-7, *а*). Если это поле достигнет некоторой критической величины, то область пленки под ним перейдет в состояние нормальной проводимости (показано штриховкой), причем магнитное поле сможет проникнуть сквозь пленку (рис. 11-7, *б*). При этом в запоминающей пленке протекают вихревые токи, нагревающие область под пересечением проводников. За время, пока она снова охлаждается, для чего требуется несколько наносекунд, вследствие возникновения новой конфигурации магнитного поля происходит разделение области на две области с нормальной проводимостью, через которые и проходит магнитный поток (рис. 11-7, *в*). В таком состоянии магнитный поток как

бы фиксируется в элементе. Он не может теперь исчезнуть даже после прекращения токов записи так как персистирующие токи, протекающие в пленке вокруг областей с нормальной проводимостью поддерживают существование магнитного потока (рис. 11-7, *г*). Этот поток называют **захваченным магнитным потоком**. Он и является носителем зафиксированного в элементе логического символа.

Если теперь после записи информации вновь возбудить управляющие провода совпадающими импульсами тока того же направ-

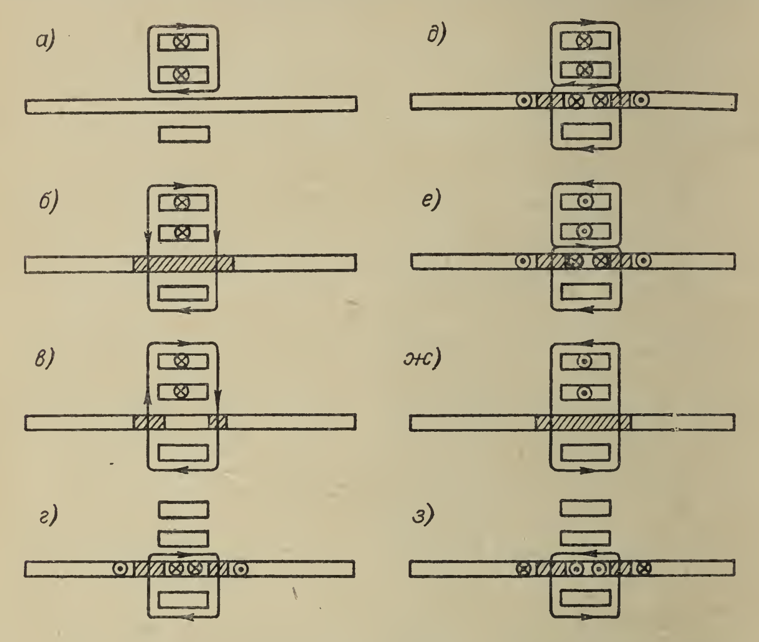


Рис. 11-7. Процесс записи информации в запоминающий элемент с захваченным потоком.

ления, то для управления элементом потребуется бóльший ток, чем раньше, так как поля управляющих токов и захваченного потока вычитаются на верхней поверхности пленки (рис. 11-7, *д*). В случае же, если импульсы тока управления имеют направление, противоположное прежнему, то переключение элемента может быть осуществлено мéньшими по величине токами записи, так как поля токов и захваченного магнитного потока суммируются (рис. 11-7, *е*). Однако сразу же после того, как пленка под пересечением проводов перейдет в состояние нормальной проводимости, исчезает ранее возникший захваченный поток и поле токов записи проникает сквозь накопительную пленку (рис. 11-7, *ж*). После прекращения же токов записи возникает захваченный поток противоположного направления (рис. 11-7, *з*).

При переключении элемента благодаря изменению потока в проводнике считывания индуктируется сигнал считывания. Считывание информации здесь разрушающее. Однако при определенных условиях удается создать элементы подобного типа, допускающие и неразрушающее считывание.

Так как проводники считывания в описанных элементах отделены от управляющих проводников сверхпроводящим экраном, роль которого выполняет накопительная пленка, то здесь практически отсутствуют наведенные помехи, что является важным достоинством элемента.

Существенной трудностью использования элементов с захваченным потоком является необходимость достаточно жестко поддерживать амплитуду управляющих импульсов во избежание разрушения информации при полувозбуждении элементов.

11-4. Запоминающие устройства на криогенных элементах и перспективы их применения

На описанных выше криотронных и сверхпроводниковых элементах с захваченным потоком на непрерывной пленке за последние годы построен ряд макетов адресных и ассоциативных ЗУ. При этом сделан ряд попыток построения на криотронах также и схем дешифрации адреса.

Описанные в литературе макеты ЗУ на криогенных элементах строились как по двухмерной, так и по трехмерной схеме.

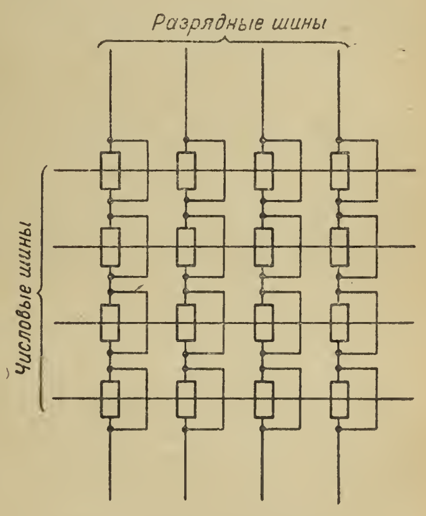


Рис. 11-8. Матрица двухмерного ЗУ на однокриотронных запоминающих элементах.

На рис. 11-8 изображена матрица двухмерного ЗУ емкостью 4 четырехразрядных чисел. Она построена на однокриотронных запоминающих элементах, описанных выше (рис. 11-4). В работе [11-37] рассматривается блок-схема макета подобного ЗУ, накопитель которого представляет собой матрицу с 256×256 запоминающими элементами, расположенными на общей подложке с семиступенчатыми древовидными дешифраторами. Общая емкость одной матрицы ЗУ составляет 1024 64-разрядных чисел. В качестве приемлемого по размерам блока ЗУ предполагается создание ЗУ на 100 таких матриц.

Наибольшей временной задержкой в этом ЗУ будет характеризоваться дешифратор (время дешифрации адреса порядка 300—

400 *нсек*). Вообще же предполагается, что по описанному принципу могут успешно строиться ЗУ емкостью до нескольких миллионов чисел с полным циклом порядка от долей микросекунды до 2 *мксек*.

На рис. 11-9 схематически изображена матрица трехмерного ЗУ на непрерывной сверхпроводящей пленке с криотронными дешифраторами адреса. Запоминающие элементы в месте пересечения взаимно перпендикулярных управляющих (селектирующих) шин представляют собой элементы с захваченным потоком, рассмотренные ранее (см. рис. 11-6).

На таких же элементах может быть построено и двухмерное ЗУ, подробно описанное, например, в [11-28]. Макет этого ЗУ был построен на небольших матрицах емкостью 638 *бит* с пятиступенчатым дешифратором. Там же приведены сведения о проекте подобного ЗУ большой емкости, построенного на матрицах 10×10 *см*. На каждой такой матрице размещается 10^5 запоминающих элементов при ширине управляющих шин 100 *мкм*. Общая емкость ЗУ на тысяче таких плат должна составить 10^8 *бит*.

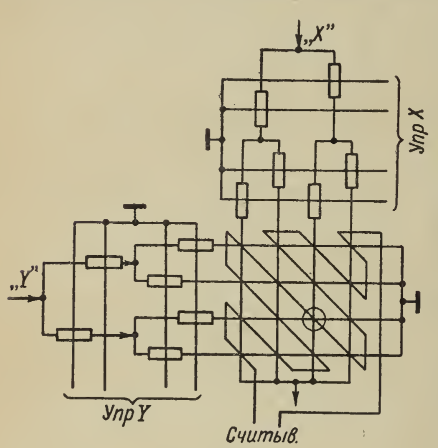


Рис. 11-9. Матрица трехмерного ЗУ на непрерывной сверхпроводящей пленке с криотронными дешифраторами.

На криогенных элементах построен также ряд макетов ЗУ с ассоциативной выборкой [2-5, 11-38 и др].

Кроме описанных выше, имеющих наибольшее практическое значение запоминающих элементов и ЗУ, в течение последнего десятилетия предложено большое количество других криогенных запоминающих элементов (ячейка Кроу, персистор, персистатрон и др.), в той или иной степени варьирующих методы использования описанных явлений в сверхпроводниках [11-5, 11-11].

Особняком стоит бистабильный элемент, основанный на явлениях, которые происходят в полупроводниках при температурах, близких к абсолютному нулю. Этот элемент получил название к р и о з а р а [11-14, 11-21].

В качестве материала для изготовления криозара применяется германий с примесью трехвалетных и пятивалентных элементов. Удельное сопротивление такого германия при температуре жидкого гелия составляет около 10^9 *ом·см*. При воздействии электрического поля напряженностью около 5 *в/см* в полупроводнике происходит обратимый неразрушающий пробой в результате так называемой ударной ионизации примесей. При этом сопротивление германия уменьшается приблизительно в 10^8 раз.

Описанный процесс характеризуется вольт-амперной характеристикой криозара, изображенной на рис. 11-10. Эта характеристика похожа на вольт-амперную характеристику газоразрядного прибора. Однако важной особенностью процессов в полупроводнике по сравнению с лавинным пробоем в газе является весьма короткое время восстановления высокого сопротивления после того, как приложенное напряжение снизится до величины, меньше критической. Это время не превышает 10 *нсек*.

Экспериментальные образцы криозаров представляли собой германиевые (с примесью индия) пластинки толщиной 0,05 *см*, на обеих сторонах которых гальваническим путем или испарением в вакууме были нанесены параллельные проводящие полоски. Эти полосы образуют контакт с пластинкой германия. Направления полосок на противоположных сторонах пластинки взаимно перпендикулярны. Таким образом, в местах пересечения полосок создаются запоминающие элементы в виде небольших объемов германия, заключенного между полосками.

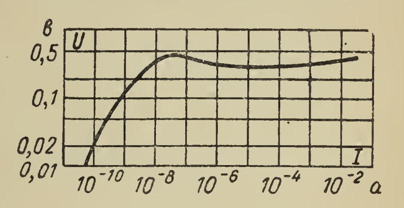


Рис. 11-10. Вольт-амперная характеристика криозара.

Площадь матриц объемом 5×5 элементов составляла 1 *см*^{2} при толщине 0,05 *см*. Предполагается, что на 1 *см*^{2} можно разместить до 20×20 элементов при одновременном снижении толщины пластины до 0,012 *см*. Это позволит довести объемную плотность упаковки (с учетом изолирующих прокладок между пластинами) до 20 000 элементов в 1 *см*^{3}.

В качестве одного из способов управления состоянием криозаров предложено применить нанесенные на каждый элемент и включенные последовательно с ним германиевые фотосопротивления. В зависимости от освещенности такого сопротивления изменяется падение напряжения на нем и соответственно напряжение, приложенное к криозару, чем и определяется возникновение или отсутствие в последнем ударной ионизации. Однако при изменении освещенности переходный процесс в криозаре длится в течение времени порядка нескольких миллисекунд, тогда как при переключении напряжением время переходного процесса не превышает единиц микросекунд, а при увеличении избытка приложенного напряжения над критическим время переключения снижается до десятков наносекунд.

В такой комбинации элемент на криозаре с фотосопротивлением представляет собой криогенную разновидность оптоэлектронного запоминающего элемента (см. § 13-2).

В заключение сделаем некоторые общие выводы об основных характеристиках криогенных ЗУ и перспективах их применения в будущем. Предполагается, что пригодность для изготовления методами интегральной технологии, удачное сочетание логических

и накопительных свойств, а также очень малые габариты и энергетические затраты сделают криогенные ЗУ наиболее подходящими в диапазоне емкостей 10^7—10^9 *бит*.

При таких больших емкостях экономия в габаритах накопителя и потреблении энергии, сможет, по-видимому, вполне скомпенсировать дополнительный объем, необходимый для размещения криогенной установки и мощность, затрачиваемую на ее работу. Важным преимуществом криогенных ЗУ является также отсутствие химической активности и диффузионных процессов при сверхнизких температурах, а также ничтожная величина флюктуации, что обусловливает высокую надежность и весьма малый уровень шумов криогенных элементов.

Однако нужно отметить, что кроме общей трудности разработки новой технологии и внедрения принципиально нового типа устройств, при разработке криогенных ЗУ необходимо учитывать ряд особенностей и затруднений, требующих преодоления проектировщиками [11-35]:

а) при очень большой емкости ЗУ нельзя пренебрегать потерями даже в сверхпроводящих шинах;

б) нужно учитывать разброс критических температур отдельных элементов, что наряду с выделением тепла уменьшает область устойчивой работы;

в) уменьшение размеров запоминающих элементов, хотя и повышает быстродействие, но приводит к уменьшению сигналов считывания.

Дальнейшие судьбы внедрения криогенных ЗУ в первую очередь зависят от успешного решения ряда технологических вопросов и, в частности, от возможностей изготовления интегральных устройств с достаточно идентичными параметрами отдельных элементов. Оптимистические прогнозы по этому вопросу высказываются, в частности, специалистами фирмы «RCA» (США), утверждающими, что созданные ими конструкции криогенных ЗУ [11-12, 11-36) обеспечивают большую плотность размещения информации (порядка 1000 *бит/см*^{2}), вполне работоспособны и пригодны для массового производства.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ДИНАМИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ

12-1. Принципы построения динамических запоминающих устройств на линиях задержки

Физической основой хранения информации с помощью линий задержки служит явление временного запаздывания (задержки) сигнала, поданного на вход линии.

Любая линия передачи обладает указанным свойством, так как скорость распространения сигнала в ней конечна.

Явление запаздывания сигнала в линиях задержки используется для построения ЗУ, позволяющих хранить информацию, представленную в виде электрических импульсов. Устройства хранения, в которых информация находится в движении по замкнутому циркуляционному кольцу, получили название *динамических* ЗУ.

Линии задержки электрических сигналов, применяемые в таких ЗУ, можно разделить на две основные группы: 1) электромагнитные линии задержки; 2) ультразвуковые линии задержки.

Устройства первой группы построены на свойстве электрических фильтров и длинных линий передавать электрические сигналы со скоростью меньшей, чем скорость распространения их в свободной среде.

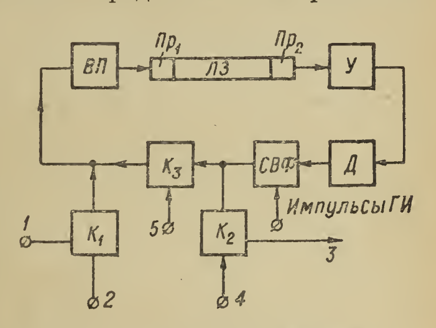


Рис. 12-1. Блок-схема динамического ЗУ с линией задержки.

ЛЗ — линия задержки; *Пр*$_1$ — входной преобразователь; *Пр*$_2$ — выходной преобразователь; *ВП* — возбудитель входного преобразователя; *У* — усилитель; *Д* — детектор; *СВФ* — схема восстановления фазы; K_1 — ключ записи; K_2 — ключ считывания; K_3 — ключ стирания.

В линиях задержки второй группы скорость распространения сигналов равна скорости ультразвука в материале линии. Электрический импульсный сигнал на входе такой линии преобразуется в ультразвуковой импульс, который распространяется в линии и поступает на приемный преобразователь, с которого вновь снимается электрический импульс.

Скорость распространения ультразвука в материале линии на несколько порядков меньше скорости распространения сигнала в электромагнитных линиях, поэтому время задержки в ультразвуковых линиях можно получить значительно больше.

Блок-схема динамического ЗУ (тракта хранения) с линией задержки показана на рис. 12-1. Информация, подлежащая записи, в виде серии электрических импульсов подается на вход *1* ключа K_1 при одновременной подаче команды «запись» в виде потенциала (уровня напряжения) на вход *2*. При применении ультразвуковых линий возбуждение ультразвуковых колебаний в материале линии (звукопроводе) осуществляется возбудителем *ВП*, который представляет собой генератор несущей частоты ударного возбуждения. Генератор модулируется видеоимпульсами информации, поступающими на его вход, и выдает радиоимпульсы, возбуждающие входной преобразователь *Пр*$_1$. Для преобразования электрических колебаний в ультразвуковые могут быть использованы пьезоэлектрический или магнитострикционный эффекты, в зависимости от типа линии задержки. Преобразование

видеосигналов в радиоимпульсы необходимо для сохранения формы импульсов и повышения к. п. д. входного преобразователя.

Одному видеоимпульсу соответствуют 5—10 периодов колебаний несущей частоты.

На выходе линии устанавливается преобразователь $Пр_2$, аналогичный входному, предназначенный для обратного преобразования ультразвуковых колебаний в электрические. При прохождении сигналов через линию задержки они значительно ослабляются. Поэтому для компенсации затухания включен усилитель *У*.

После усиления радиоимпульсы детектируются в детекторе *Д* и поступают на один вход схемы восстановления фазы *СВФ*, на второй вход которой поступают импульсы генератора импульсов *ГИ*, синхронизирующего работу тракта хранения и всей вычислительной машины. Необходимость восстановления фазы сигналов, хранящихся в динамическом ЗУ, вытекает из того, что за каждый цикл обращения сигналов по циркуляционному кольцу неизбежны фазовые сдвиги, обусловленные характеристиками электрической цепи и колебаниями температуры, изменяющими время задержки.

Схема восстановления выдает на выходе сигнал заданной формы при одновременной подаче на оба ее входа импульса информации и импульса *ГИ*.

Ключи $К_2$ и $К_3$ служат соответственно для считывания и стирания информации. Считывание производится с выхода *3* при одновременной подаче на вход *4* команды «считывание». При подаче на вход *5* команды «стирание» (отсутствие управляющего потенциала) ключ $К_3$ закроется и информация, хранящаяся в тракте хранения, сотрется.

Емкость динамического ЗУ определяется количеством информации, которая может храниться в тракте. Ее можно определить из соотношения

$$M = \tau f, \tag{12-1}$$

где M — объем информации в *битах*; τ — время задержки в линии; f — частота следования импульсов.

Быстродействие динамических ЗУ характеризуется периодом циркуляции информации в тракте, который равен времени задержки в линии. Задержкой в электрических цепях схемы (усилителе, детекторе и т. д.) можно пренебречь.

Для увеличения емкости тракта хранения необходимо увеличить время задержки линии или частоту следования импульсов. Однако частота следования кодовых импульсов ограничена шириной полосы пропускания тракта хранения и быстродействием других устройств машины (скоростью выполнения арифметических операций). Изготовление линий с большим временем задержки связано со значительными трудностями, к тому же увеличение времени задержки уменьшает быстродействие тракта хранения.

Для характеристики динамического ЗУ вводят понятие среднего времени ожидания, равного полусумме наименьшего времени ожидания ($t_{\text{ож. мин}} = 0$) и наибольшего времени ожидания ($t_{\text{ож. макс}} = \tau$). Тогда

$$t_{\text{ож. ср}} \approx \frac{\tau}{2}. \qquad (12\text{-}1)$$

Для увеличения быстродействия ЗУ можно применять линии задержки с отводами, позволяющими производить промежуточное считывание информации, не ожидая полного цикла обращения.

В ультразвуковых линиях изменение времени задержки определяется зависимостью скорости распространения ультразвука от колебаний температуры, при этом изменением линейных размеров звукопровода можно пренебречь. При значительных колебаниях температуры изменяется период обращения информации в тракте хранения и нарушается процесс синхронизации импульсами главного генератора. Если фазовый сдвиг между импульсами генератора и импульсами, хранящимися в тракте, достигает такой величины, что импульсы генератора будут приходить на один вход схемы восстановления фазы в момент времени, когда на другом входе будут иметь место промежутки между импульсами хранящегося кода, то информация сотрется. Для устранения процесса самостирания информации, вызванного изменением окружающей температуры, применяются два способа компенсации изменений температуры.

Первый способ заключается в помещении всех линий задержки в термостат, в котором автоматически поддерживается постоянная температура.

Второй способ заключается в применении специальной электронной следящей системы, которая автоматически производит изменение частоты следования импульсов главного генератора в соответствии с температурными изменениями времени задержки линии.

12-2. Ультразвуковые линии задержки с пьезоэлектрическими преобразователями

В ЗУ на ультразвуковых линиях задержки могут использоваться различные звукопроводы. Практическое применение нашли ртутные линии задержки, линии на плавленом кварце, сплавах магния и некоторые другие.

К звукопроводу предъявляются следующие основные требования: минимальное затухание ультразвука на выбранной несущей частоте; минимальная зависимость скорости ультразвука от температуры в рабочем диапазоне температур и возможность хорошего согласования с преобразователем.

В качестве звукопровода применяются как твердые, так и жидкие среды. В жидких средах могут возбуждаться только

продольные ультразвуковые волны, а в твердой среде могут существовать ультразвуковые продольные, поперечные и поверхностные волны.

Для некоторых материалов, используемых в качестве звукопровода, в табл. 12-1 приводятся приближенные данные скорости распространения и затухания ультразвуковых колебаний [12-2].

Таблица 12-1

Материал	Скорость продольных колебаний, *м/мсек*	Скорость поперечных колебаний, *м/мсек*	Затухание *дб/м*	Примечание
Ртуть	1,44	—	4	Затухание измерялось на частотах порядка 10—15 *Мгц*
Плавленый кварц	5,9	3,8	2	
Алюминий	6,3	3,1	35	

В первых вычислительных машинах, создание которых относится к концу сороковых годов, были использованы применявшиеся в радиолокационной технике и освоенные к тому времени промышленностью ртутные линии задержки.

Максимальное время задержки ртутных линий обычно находится в пределах 500—1000 *мксек*, но может достигать 3000 *мксек*.

Простейшая ртутная линия задержки представляет собой стеклянную или металлическую трубку, наполненную звукопроводящей средой — ртутью, закрытую по обоим концам кварцевыми пьезопреобразователями *X*-среза, аналогичными по конструкции. Напряжение от генератора подводится к наружной поверхности пластины пьезопреобразователя, а вторым электродом служит ртуть. Ртутные линии имеют малое затухание, малый уровень ложных сигналов и относительно большую полосу пропускания.

Существенным недостатком, из-за которого сейчас отказались от применения ртутных линий, является сложность и неудобство их эксплуатации. Ртуть ядовита, в процессе работы она постепенно загрязняется и требует периодической очистки. Такие линии чувствительны к вибрациям ввиду образования воздушных пузырьков, что приводит к резкому увеличению затухания. Кроме того, эти линии имеют большой вес и габариты.

Линии задержки с твердым звукопроводом имеют малые габариты и вес и не требуют почти никакого ухода. Для звукопровода применяются плавленый кварц и сплавы магния.

На плавленом кварце создают линии задержки на несущие частоты 30 *Мгц* и выше. Но плавленый кварц является дорогим материалом и требует для своей обработки специального оборудования. Более дешевы и просты в обработке сплавы магния, из которых можно конструировать линии задержки на несущие частоты до 10—15 *Мгц*.

Для уменьшения габаритов звукопровод конструируют иногда с многократным отражением ультразвукового луча.

При использовании линий задержки с твердым звукопроводом создаются большие трудности, связанные с возникновением дополнительных отражений от граней звукопровода, что приводит к наличию ложных сигналов (помех) на выходе таких линий.

Несколько конструкций линий задержки создано также на принципе использования поверхностных волн, представляющих собой упругие колебания, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твердого тела (волны Рэлея). В одной из конструкций такого типа звукопровод был выполнен в виде винтовой дорожки, нарезанной на поверхности дюралевого цилиндра.

В качестве преобразователя колебаний во всех описанных выше линиях задержки применяются пьезоэлектрические преобразователи, изготовленные из кристаллического кварца или керамики титаната бария.

Основным требованием, предъявляемым к пьезопреобразователям, является обеспечение минимума потерь при преобразовании сигнала. Потери на преобразование и полоса пропускания ультразвуковой линии задержки во многом зависят от конструкции крепления пьезопреобразователя и способа соединения его со звукопроводом. Для сведения потерь к минимуму необходимо обеспечить надежный акустический контакт между пьезопреобразователем и звукопроводом. Ртуть, применяемая в качестве звукопроводящей среды в ртутных линиях задержки, обеспечивает хорошее согласование с пьезопреобразователем.

В линиях задержки с твердым звукопроводом, например, из кварца или сплава магния, акустический контакт в лабораторных условиях часто обеспечивается с помощью минеральных масел, например, трансформаторного масла; в эксплуатационных же условиях, где необходим более надежный акустический контакт, пьезопреобразователь приклеивают к звукопроводу эпоксидной смолой.

12-3. Магнитострикционные линии задержки

Магнитострикционная линия задержки состоит из передающего и приемного преобразователей и звукопровода, выполненного из материала, обладающего магнитострикционным эффектом.

Для преобразования электрических сигналов в ультразвуковые колебания используется магнитострикционный эффект, свойственный некоторым ферромагнитным материалам, сплавам, а также ферритам [12-1].

Магнитострикцией называется явление изменения формы и размеров тела при его намагниченности.

Обратный магнитострикционный эффект состоит в том, что при упругой деформации возникает намагничивание участка материала.

Передающий преобразователь, состоящий из катушки, охватывающей звукопровод, преобразует электрические импульсы в упругие импульсы, которые распространяются в звукопроводе, выполненном в виде проволоки, со скоростью звука, определяемой константами материала (для никеля $5 \cdot 10^5$ *см/сек*).

Принципиальная схема магнитострикционной линии показана на рис. 12-2.

Достигнув приемного преобразователя, упругие импульсы преобразуются в электрические сигналы, задержанные относительно входных сигналов. Постоянный магнит, помещенный у приемного преобразователя, предназначен для создания постоянного потока смещения, пронизывающего приемный преобразователь, находящийся в поле магнита.

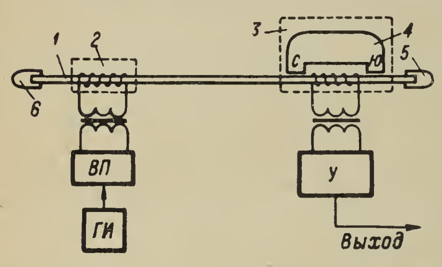


Рис. 12-2. Принципиальная схема ультразвуковой магнитострикционной линии задержки.

1 — звукопровод; *2* — передающий преобразователь; *3* — преобразователь-приемник; *4* — постоянный магнит; *5* и *6* — поглощающее вещество для подавления отраженных сигналов; *ВП* — возбудитель преобразователя датчика (генератор несущей частоты); *ГИ* — генератор импульсов кода; *У* — усилитель.

Когда механические колебания достигают приемного преобразователя, происходит изменение величины магнитного потока, вызванного вторичным (обратным) магнитострикционным эффектом, и в витках катушки будет индуктироваться э. д. с.

Работа магнитострикционной линии задержки зависит от трех основных явлений: возбуждения механических колебаний (или импульсов) в упругой среде посредством магнитострикционного эффекта, распространения ультразвуковых колебаний по упругой среде и преобразования механических колебаний с помощью обратного магнитострикционного эффекта.

При рассмотрении процессов преобразования электрических колебаний в механические различают две ступени преобразования в излучающем преобразователе [12-4]: 1) действие э. д. с. на входе вызывает появление переменного магнитного поля; 2) действие переменного магнитного поля вызывает механические колебания.

Наиболее важной характеристикой линии является ее частотная характеристика (ширина полосы пропускания), которая зависит от длины катушки преобразователя и закона распределения магнитного поля вдоль преобразователя. Кроме того, существенное влияние на эту характеристику оказывают параметры электрической цепи преобразователя, так как ими определяется характер процессов в звене электромагнитного преобразователя. При передаче через линию видеосигналов спектр частот сигнала очень широк, но все составляющие спектра будут вызывать различные по величине составляющие магнитострикционной силы;

причем составляющие с более высокими частотами будут выражены слабее из-за ослабления высоких частот в элементах электромагнитного преобразователя благодаря влиянию паразитных емкостей и поверхностного эффекта. Эта особенность звена электромагнитного преобразования является одной из важнейших причин сужения полосы пропускания, для расширения которой применяются особым образом сконструированные преобразователи и корректированные по высокой частоте усилители.

Конструкция звукопровода также сказывается на частотной характеристике линии. Звукопровод может быть выполнен из проволоки, тонкостенной трубки или тонкой ленты.

При конструировании магнитострикционных линий задержки находят также широкое применение звукопроводы, выполненные в виде пучка из тонких проволок. Описанная в [12-3] линия с таким звукопроводом может содержать от 3 до 40 жил диаметром 0,1—0,3 *мм*.

При распространении импульса вдоль линии задержки наблюдается изменение его формы, обусловленное дисперсионным эффектом (зависимостью скорости распространения от частоты). Так как спектр импульса состоит из ряда частот, а фазовая скорость распространения ультразвука зависит от частоты, то искажение формы импульса неизбежно. При изменении частоты от 250 *кгц* до 1 *Мгц* изменение скорости достигает 3%.

Явление дисперсии зависит от термической обработки звукопровода. Исключительно важной операцией при обработке никелевых звукопроводов является отжиг в течение 15—30 *мин* при температуре 800—900° С. Амплитуда выходного сигнала у отожженного материала по сравнению с амплитудой у того же материала до отжига возрастает примерно в четыре-пять раз [12-3].

Для обеспечения постоянства времени задержки, независимо от изменения окружающей температуры, как правило, линия должна быть помещена в термостат.

Несмотря на значительные успехи в разработке и конструировании быстродействующих оперативных ЗУ на ферритовых сердечниках и других ферромагнитных элементах, ЗУ на линиях задержки продолжают сохранять свое значение, как весьма дешевые устройства, хорошо приспособленные для хранения относительно небольших объемов информации в некоторых специальных схемах и небольших ЦВМ с последовательной обработкой информации.

В качестве примера можно сослаться на ЗУ с полупроводниковой схемой управления [12-9] на линии задержки из никелевой проволоки диаметром 1 *мм*, конструктивно выполненное в виде плоской спирали, укрепленной на металлическом основании. Размеры конструкции 360×360×50 *мм*. Основные параметры ЗУ таковы: рабочая частота 50—1000 *кгц*; время задержки 80—3000 *мксек*; амплитуда импульсов считывания 80 *мв*; потребляемая мощность 1,5 *вт*.

В многоканальном анализаторе применено ЗУ на магнитострикционной линии задержки [12-7] из никелевой проволоки марки «Н-1 твердая» диаметром 0,2 *мм* и длиной 7,5 *м*. Емкость ЗУ составляет 750 *бит*, рабочая частота 500 *кгц*. Сигнал считывания составляет 2—3 *мв*. Общее потребление энергии 0,4 *вт*. Конструктивно ЗУ оформлено в виде блока 220×200×75 *мм*. Линия задержки свернута в цилиндрическую двухрядную спираль диаметром 150 *мм*, свободно подвешенную на опорах из целлулоидной пленки.

В литературе также имеется большое число сообщений зарубежных фирм о выпуске ЗУ на магнитострикционных линиях задержки емкостью несколько тысяч и даже десятков тысяч бит [12-19, 12-20, 12-22, 12-26 и др.]. На линиях задержки строятся и ассоциативные ЗУ [12-12].

12-4. Электромагнитные линии задержки

Электромагнитные линии задержки широко применяются в импульсной технике, когда требуются задержки от долей микросекунды до нескольких десятков микросекунд. Различают линии задержки с сосредоточенными параметрами и линии с распределенными параметрами L и C.

Линии задержки с сосредоточенными параметрами L и C представляют собой последовательное соединение элементарных ячеек фильтров нижних частот.

При использовании линий задержки на время менее 10 *мксек*, когда число звеньев фильтра невелико, полоса частот неискаженной передачи определяется частотной характеристикой линии задержки. При увеличении числа звеньев решающим фактором являются значительные фазовые искажения, и применимость данной линии будет определяться фазовой характеристикой линии задержки. Для обеспечения минимального искажения при передаче импульсов важным фактором является согласование волнового сопротивления линии ρ с сопротивлением нагрузки $R_н$.

Линии задержки с распределенными параметрами L и C могут быть созданы в виде коаксиального или двухпроводного кабеля, если один провод, свернутый спиралью, поместить в металлическую оплетку, которая служит вторым проводом.

Затухание в такой линии определяется активным сопротивлением провода и диэлектрическими потерями. Оно также зависит от частоты из-за поверхностного эффекта и возрастания диэлектрических потерь с увеличением частоты.

Линии задержки со спиральным проводом могут быть изготовлены с большим сопротивлением — порядка нескольких тысяч ом.

Для задержки сигнала на 1 *мксек* требуется длина линии от 50 до 500 *см*. Допускается изгибание таких линий и сворачивание их в бухты, но с определенным радиусом закругления. В лите-

ратуре имеются сообщения о применении подобных линий задержки для построения ЗУ рециркуляционного типа, работающих с частотой тактирующих импульсов до 20 *Мгц*. В качестве линии задержки в них используется коаксиальный кабель с временем задержки до 300 *нсек*.

В течение ряда лет ведутся разработки элементов электронных вычислительных машин, в которых информация кодируется радиоимпульсами сверхвысоких частот [12-6]. Несущая частота радиоимпульса составляет порядка 10000 *Мгц*, а тактовая частота машины может достигать 1000 *Мгц*. При таких частотах можно успешно применять динамические ЗУ на волноводных линиях задержки.

Представляет интерес экспериментальная разработка ЗУ на сверхпроводящей коаксиальной линии задержки [12-10] с центральной ниобиевой жилой, тефлоновым диэлектриком и свинцовой оплеткой. Эта линия задержки при длине коаксиального кабеля около 200 *м* и частоте повторения импульсов 125 *Мгц* обеспечивает хранение 125 *бит*.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

13-1. Фотографические запоминающие устройства

Простейшим принципом построения оптического ЗУ является принцип модуляции светового луча (рис. 13-1). При этом информация записывается на маске, прозрачные и непрозрачные участки которой соответствуют хранению «1» и «0». Для считывания информации может использоваться однородный световой пучок, освещающий всю маску одновременно, либо узкий луч, сканирующий элементы маски поочередно. Фотоприемники, расположенные за маской, предназначаются для преобразования световых сигналов в электрические.

Одним из видов носителей информации, допускающих самую высокую из практически реализуемых в настоящее время плотность записи, являются фотографические материалы. Это обусловлено очень высокой разрешающей способностью современных фотографических эмульсий. Лучшие сорта черно-белой пленки, например, позволяют различать до тысячи отдельных элементов на 1 *мм*. Таким образом, принципиально уже сейчас можно достигнуть плотности записи информации до 10^6 *бит/мм*^{2}. Правда, фотографические материалы могут, как правило, использоваться только для однократной записи информации и, таким образом, они могут успешно применяться в качестве носителя лишь в постоянных ЗУ.

Если бы оказалось возможным реализовать надежное обращение к каждому из микроскопически малых запоминающих элементов на фотоносителе, то можно было бы создать малогабаритные устройства хранения информации колоссальной емкости. Например, информацию, заключающуюся во всех когда-либо напечатанных книгах всех стран мира, можно было бы хранить в ЗУ объемом порядка нескольких кубических метров.

Хотя техника еще и весьма далека от практической реализации процесса записи и, главное, оперативного считывания информации при таких больших плотностях хранения ее на фотографических носителях, тем не менее уже в настоящее время разработаны экспериментальные постоянные ЗУ такого типа, в наиболее совершенных образцах которых плотность записи информации достигает нескольких тысяч двоичных цифр на 1 *см*². Это в несколько раз превышает наибольшую плотность записи, которая достигнута в одном из наиболее компактных ЗУ — на магнитной ленте.

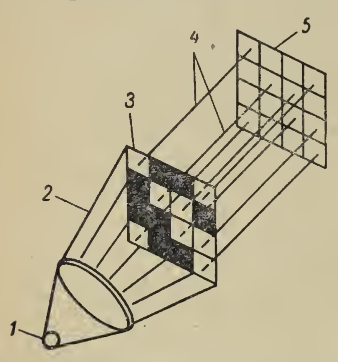


Рис. 13-1. Модуляция светового луча с помощью маски.

1 — источник света; *2* — немодулированный световой луч; *3* — маска с данными; *4* — оптические информационные сигналы; *5* — фотоприемники.

Положительным свойством ЗУ на фотографических носителях, или, как их иногда называют, фотоскопических ЗУ, является также то, что в них может быть достигнута весьма большая скорость считывания, которая никак не зависит от свойств фотографического носителя, а определяется практически лишь временем дешифрации адреса и обращения к нужной ячейке, а также частотной характеристикой фотоэлемента и временем, необходимым для усиления считываемых импульсов.

Поиск нужного запоминающего элемента на фотоносителе может осуществляться механическим перемещением носителя под неподвижным лучом, либо движением луча, либо, наконец, комбинированным способом, при котором сочетаются и механическое движение носителя и перемещение луча по его плоскости.

В фотоскопических ЗУ, разработанных за последние годы, все более широкое применение находит волоконная оптика, позволяющая подводить и отводить световые потоки от весьма малых участков поверхности фотоносителя.

Практически наиболее просто проблема считывания решается путем механического перемещения фотоносителя, например, кинопленки с записанной на ней информацией, относительно источника света и фотоэлемента. Однако при этом скорость считывания, как и в ЗУ на магнитной ленте, оказывается малой, так как она

лимитируется относительно небольшой допустимой скоростью транспортировки носителя.

В начале 50-х годов в США было разработано экспериментальное дисковое фотоскопическое ЗУ, в котором при считывании комбинируется принцип развертки электронным лучом и механического движения [13-33]. Это ЗУ изображено схематически на рис. 13-2. На прозрачном фотоскопическом диске диаметром около 30 *см*, покрытом фотоэмульсией с большой разрешающей способностью, информация нанесена в виде вертикальных непрозрачных штрихов, расположенных концентрическими окружностями, образующими кольцо шириной около 12 *мм*. В круге *А*

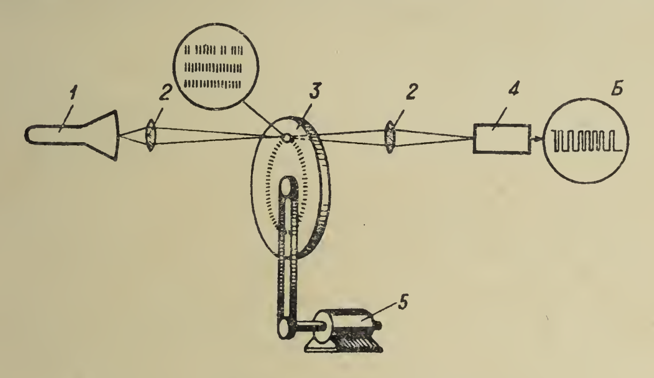


Рис. 13-2. Дисковое фотоскопическое ЗУ.

1 — электроннолучевая трубка; *2* — оптические линзы; *3* — фотоскопический диск; *4* — фотоумножитель; *5* — электродвигатель.
А — участок диска в увеличенном виде; *Б* — форма выходного сигнала.

показан в увеличенном виде небольшой участок диска с тремя такими дорожками штриховой записи.

Для считывания информации с некоторой дорожки электронный луч в трубке направляется в определенную точку экрана, откуда светящееся пятно при помощи линзы проецируется на нужную дорожку фотоскопического диска. Когда в результате вращения диска на пути светового луча окажется участок с искомой информацией, то она считывается фотоумножителем, на выходе которого получается импульсное напряжение, имеющее форму, показанную в круге *Б*.

Всего на диске записано около $3 \cdot 10^7$ *бит*, скорость вращения — 1400 *об/мин*, среднее время выборки около 30 *мсек*.

Позднее в лабораториях фирмы «Белл» (США) было разработано постоянное ЗУ на неподвижных фотографических пластинах с разверткой бегущим лучом [13-31]. Это устройство большой емкости с быстрым произвольным доступом предназначено для электронных автоматических телефонных станций, однако может

найти применение и для других целей, в частности как постоянная память электронных вычислительных машин.

Запись информации в описываемом ЗУ осуществляется на нескольких участках пластинки, причем число этих участков равно числу разрядов в запоминаемых числах. Один двоичный разряд каждого числа записывается в точках, которые находятся в одной и той же адресной позиции на всех участках фотопластинки. Обращение к этим точкам или запоминающим элементам как при записи, так и при считывании информации обеспечивается множеством световых лучей (по количеству разрядов в числе), создаваемых одной электроннолучевой трубкой и группой параллельных линзовых объективов, каждый из которых проецирует точечное световое пятно экрана на соответствующие точки всех участков фотоэмульсии. За фотопластинкой помещается фотоумножитель, на выходе которого при считывании и получаются сигналы в виде импульсов напряжения, соответствующие считываемой информации.

Общая емкость этого ЗУ—$2{,}2\cdot10^6$ *бит*, время произвольной выборки числа — 5 *мксек*.

В современных фотоскопических ЗУ разрешающая способность фотоносителей обычно значительно превосходит разрешающую способность оптических считывающих устройств. Однако в тех случаях, когда удается создать считывающий луч с диаметром порядка нескольких микрон, начинает сказываться влияние зернистости фотоэмульсий. Нерегулярное распределение зерен в фотоэмульсии создает эффект, эквивалентный шумам приемника и, естественно, снижает достоверность считываемой информации [13-1]. Поэтому в качестве носителей ЗУ с высокой разрешающей способностью желательно применять возможно более мелкозернистые эмульсии.

Для повышения помехоустойчивости ЗУ от помех, обусловленных зернистостью носителя, непрозрачными вкраплениями, частицами пыли и так далее, можно применить способ записи на фотоноситель оптических сигналов, например, изображений в виде узкой полоски, соответствующей записи «1», пропущенных предварительно через дифракционную решетку [13-36]. В результате интерференции на носителе параллельно основной линии создаются боковые полоски, которые как бы дублируют основную информацию. Применяя для записи других разрядов монохроматический свет другой частоты, можно на один и тот же участок носителя записывать несколько бит информации в виде наложения нескольких интерференционных пятен. Этот принцип сближает предлагаемый способ с голографической записью, которая будет рассмотрена в § 13-3.

Повышения плотности записи можно добиться, применяя фотохромные носители информации, которые допускают в принципе хранение в одной точке более чем одного бита информации [13-13, 13-41]. Особенно привлекательны фотохромные носители еще и тем,

что они позволяют осуществлять исправление записанной ранее информации, т. е. могут применяться не только в качестве постоянных, но и в качестве полупостоянных ЗУ (см. гл. 14).

Несколько разработок, целью которых является создание ЗУ на фотоносителях сверхбольшой емкости, осуществлено фирмой «IBM» (США). В одной из опытных моделей ЗУ емкостью 10^9 *бит* при времени выборки 1,6—2,7 *сек* применена специальная самопроявляющаяся пленка с органическим красителем [13-38]. На этой пленке, не чувствительной к видимому свету, запись производится ультрафиолетовым излучением, после чего считывание может производиться в видимом свете.

В другой разработке [13-34] информация записывается на отрезках фотопленки размером 35×70 *мм*, заключающих до 5 млн. *бит*. Эти отрезки в количестве 32 штук монтируются на рамках из пластмассы. Для подачи к считывающему устройству рамок используются пневматические устройства, обеспечивающие доступ к любой рамке в течение 3 *сек*.

Не получил пока практической реализации, но весьма интересен макет ЗУ с записью модулированным лучом аргонного лазера. Под влиянием этого луча за счет испарения полиэфирного светонепроницаемого покрытия ленты образуются микроскопические просветленные участки. В этом ЗУ предполагается осуществление хранения информации с плотностью до 10^6 *бит/мм*^{2} [13-20].

Имеется проект использования в качестве считываемого «на просвет» носителя информации пластинок из ферроэлектрической керамики [13-44], допускающей запись с плотностью до нескольких десятков бит на квадратный миллиметр.

В заключение отметим, что фотоскопические ЗУ обладают рядом существенных достоинств:

1) очень высокая плотность фиксации информации;

2) нечувствительность к изменениям температуры;

3) неразрушающее считывание информации;

4) высокое быстродействие, лимитируемое только схемами управления;

5) высокая стойкость к радиоактивным излучениям.

Эти достоинства определяют значительные перспективы фотоскопических постоянных ЗУ, особенно в связи с разработкой новых способов и схем управления лучом, обеспечивающих осуществление быстрых, надежных и экономичных методов считывания информации.

Фотоскопические ЗУ в комбинации с менее емкими, но более гибкими стирающимися ЗУ, используемыми в качестве буферных устройств, найдут, по-видимому, в будущем широкое применение в машинах, требующих хранения большого объема постоянной информации, как, например, справочно-информационные машины и машины для автоматического перевода.

13-2. Оптоэлектронные запоминающие устройства

Оптоэлектронными приборами, или **о п т р о н а м и**, называют такие приборы и устройства, в которых передача и накопление сигналов обусловлены как световыми, так и электронными процессами. Эти приборы в настоящее время выполняются главным образом на основе применения различных электролюминесцентных и фотопроводящих материалов (фоторезисторов), а иногда и ламп тлеющего разряда.

Связь между обеими компонентами оптрона может быть оптической, электрической или комбинированной. В частности, при сочетании оптической и электрической связи можно, используя положительную обратную связь, построить бистабильный элемент, пригодный для хранения двоичной информации.

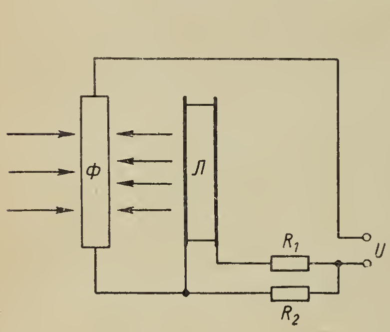


Рис. 13-3. Схематическая конструкция оптоэлектронного триггера.

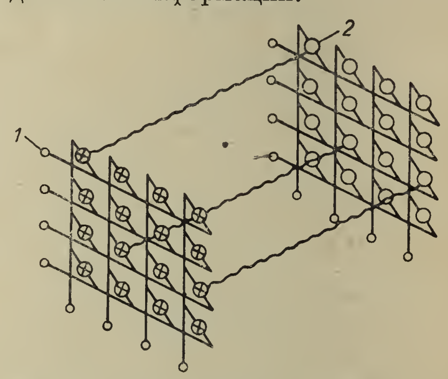


Рис. 13-4. Запоминающая матрица из оптоэлектронных элементов (*1*) и матрица из фотоприемников (*2*).

Схематическая конструкция такого элемента (оптоэлектронного триггера) показана на рис. 13-3. При освещении извне фоторезистора *Ф* его сопротивление резко снижается и, следовательно, возрастает напряжение на электролюминофоре *Л*. Свечение последнего возрастает и при соответствующем подборе элементов и сопротивлений цепи, обеспечивает сохранение высокой проводимости фоторезистора и после прекращения внешнего светового импульса. Это новое состояние прибора, характеризующееся значительным световым излучением люминофора и высокой проводимостью фоторезистора, устойчиво сохраняется благодаря наличию положительной обратной световой связи между элементами. Из этого состояния триггер может быть выведен кратковременным понижением напряжения или выключением питания. Роль электролюминесцентного элемента в оптоэлектронном триггере может выполнять и лампа тлеющего разряда.

Соответствующие конструктивное и технологическое решения оптоэлектронных триггеров могут обеспечить изготовление на их

основе достаточно миниатюрных, надежных и экономичных запоминающих элементов. Однако основным недостатком их является медленное срабатывание, которое определяется временны́ми характеристиками фоторезистора и электролюминофора. Время срабатывания является также обратной функцией освещенности и составляет от 10 *сек* до 2 *мсек*. Некоторые конструктивные и электрические способы повышения быстродействия оптоэлектронных триггеров рассмотрены в работе [13-2].

На описанных элементах может быть построено ЗУ матричного типа (рис. 13-4), в котором запись производится путем подачи совпадающих во времени импульсов напряжения. Считывание информации из этого ЗУ осуществляется с помощью матрицы, содержащей фотоприемники. Каждый из фотоприемников соответствует определенному оптоэлектронному триггеру (оптические сигналы от триггеров к фотоприемникам показаны на рисунке волнистыми линиями). Следовательно, величина проводимости в пересечениях матрицы фотоприемников является индикатором состояний соответствующих триггеров. Благодаря отсутствию электрической связи между триггерами и фотоприемниками в этом ЗУ, во-первых, считывание информации происходит без разрушения и, во-вторых, имеется возможность одновременного выполнения операций записи и считывания.

Разработан также ряд конструкций постоянных и полупостоянных ЗУ со сменными перфорированными картами или фотоскопическими масками. В этих ЗУ в качестве источника света используется слой люминофора [13-30]. Плата такого ЗУ представляет собой многослойную конструкцию из люминофора, системы ортогональных селектирующих шин и стеклянной фотоскопической маски. Каждый элемент матрицы имеет площадь около 0,1 *мм*². Площадь всей матрицы в 128×128 элементов составляет 40,7 *см*². Считывание информации осуществляется подачей в шины соответствующего разряда и столбца синусоидальных напряжений с частотами 667 и 500 *кгц*, в результате чего возбужденный участок люминофора излучает световой поток, модулированный в числе других частот разностной частотой 167 *кгц*. На эту частоту и настраивается усилитель сигналов, снимаемых с фотоумножителя. В описанном ЗУ, как и в ЗУ, изображенном на рис. 13-4, каждому запоминающему элементу (отверстию в маске) соответствует свой фотоприемник, что, безусловно, нельзя считать экономичным решением вопроса. Применяя волоконную оптику, можно использовать один общий фотоприемник для всех одинаковых разрядов чисел, фиксированных в запоминающей матрице [13-4].

Обсуждаются также возможности создания ЗУ на основе квантовых усилителей и генераторов [13-3, 13-7], однако эти разработки носят пока теоретический и экспериментальный характер и еще далеки от практической реализации в действующих системах.

Существует ряд предложений о создании оптических динамических ЗУ на световых линиях задержки [13-16]. Одним из

решений задачи является разработанная в лабораториях фирмы «Белл» (США) конструкция, состоящая из двух зеркал, удаленных друг от друга на 3 *м* и установленных параллельно так, что луч лазера, падающий на одно из них, претерпевает до 1000 отражений. В такой оптической линии задержки можно хранить до 10 тыс. *бит*.

Разработан и ряд других, иногда весьма интересных и остроумных вариантов ЗУ, которые могут найти применение в оптических ЦВМ будущего [13-11].

13-3. Голографические запоминающие устройства

Интереснейшие перспективы таит в себе применение для хранения информации в кибернетических машинах принципов голографической записи, получающих распространение в связи с успехами лазерной техники. Отличие г о л о г р а ф и и [13-10, 13-42] от обычной фотографии заключается в следующем. При фотографии на фотопластинке в каждой ее точке регистрируется лишь квадрат амплитуды (интенсивность) волны в фокальной плоскости линзы, а информация о фазах рассеянной волны безвозвратно теряется. На голограмме же фиксируется интерференционная картина, которая хотя и не похожа внешне на объект, но несет о нем в зашифрованном виде информацию, значительно более богатую, чем простая фотография, а именно, информацию как об амплитуде, так и о фазе световой волны, распространяющейся от объекта.

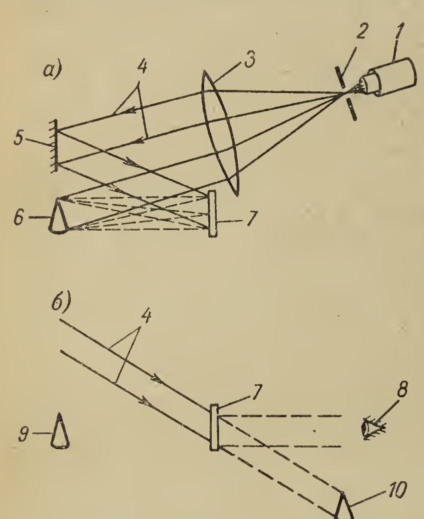


Рис. 13-5. Схема процессов фиксации (*а*) и воспроизведения (*б*) изображения в голографии.

1 — лазер; *2* — микроотверстие; *3* — линза; *4* — луч лазера; *5* — зеркало; *6* — объект; *7* — фотопластинка; *8* — глаз; *9* — первичное изображение; *10* — сопряженное изображение.

Схематически процессы голографии иллюстрируются на рис. 13-5. При записи изображения (рис. 13-5,*а*) объект фиксируется на фотопластинке *7* в виде г о л о г р а м м ы — сложного узора, возникающего в результате интерференции на поверхности пластинки лучей когерентного света лазера, рассеянных объектом *6* и отраженных от зеркала *5*. Процесс фиксации на голограмме можно образно представить себе как «замораживание» волновой картины, возникающей в месте нахождения фотопластинки при интерференции. Если затем осветить голограмму лучами того же

лазера (рис. 13-5, *б*), то световая волна как бы «размораживается» и распространяется дальше. В результате освещения голограммы возникают два изображения объекта: мнимое *9* и сопряженное ему действительное *10*.

Важнейшим достоинством голографии является ее высокая надежность, обусловленная тем, что каждый микроучасток объекта рассеивает свет на всю поверхность фотопластинки, а каждый микроучасток фотопластинки, в свою очередь, хранит информацию о всем объекте. В результате этого те или иные дефекты фотопластинки, неравномерность освещения объекта, смещение фотопластинки (при сохранении ее угловой ориентации относительно направления луча лазера) и даже значительные повреждения пластинки не препятствуют воспроизведению объекта, лишь ухудшая отношение сигнал/помеха. Более того, изображение может быть получено даже при наличии лишь некоторой части (осколка) пластинки.

Уже в настоящее время построены макеты голографических ЗУ емкостью до 10^6 *бит*, причем специалисты фирмы «IBM» (США) полагают, что в 70-годах начнется реальное использование голографических ЗУ в вычислительных машинах [13-21].

Наряду с записью интерференционных картин в виде плоских голограмм возможна также и объемная многослойная запись в толстослойных эмульсиях. Теория подобной трехмерной записи и последующего поиска информации, которая положена в основу нового оптического ЗУ на твердом теле, разработана Хирденом [13-18, 13-19].

Он предложил использовать в качестве таких объемных носителей информации полупрозрачные окрашенные материалы, подобные щелочно-галоидным кристаллам с центрами окрашивания (F-центрами), равномерно расположенными по объему кристалла. Запись информации осуществляется двумя лучами когерентного света $\overline{A}_0$ и $\overline{A}_1$, которые направляются под разными углами к плоскости кристалла. Эти лучи создают в кристалле интерференционные картины в виде параллельных плоскостей, причем под воздействием облучения происходит избирательное обесцвечивание F-центров. Для считывания информации кристалл освещают только одним из лучей, например, $\overline{A}_0$, в результате чего появляется плоская волна $\overline{A}_1$, несущая информацию.

По расчетным данным удельная плотность записи информации с учетом шумов, источниками которых могут явиться случайные распределения центров окрашивания в кристалле, может быть доведена до 10^{12}—10^{13} *бит/см*^{3}.

В заключение следует сказать, что различные оптические и оптоэлектронные методы записи, хранения и считывания информации, хотя и реализуются пока в основном в макетах, в будущем, по-видимому, получат дальнейшее развитие и применение, особенно в сверхбыстродействующих оптических машинах.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ПОСТОЯННЫЕ ЗАПОМИНАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

14-1. Постоянные запоминающие устройства и их классификация

Постоянными запоминающими устройствами (ПЗУ) называют такие ЗУ, из которых в процессе их нормальной работы производится только выборка (считывание) ранее записанной информации. Эти устройства называют также односторонними, долговременными, фиксированными, пассивными, задающими ЗУ. Они используются в вычислительных и управляющих устройствах, в схемах автоматики и установках для научного эксперимента для хранения некоторых часто встречающихся величин, стандартных программ и подпрограмм, кодов операций при микропрограммировании, таблиц функций, признаков для сортировки, словарей для перевода текста с одного языка на другой и прочей информации, которая остается неизменной при решении разнообразных задач. В связи с расширением использования алгоритмических языков, постоянные ЗУ все более широко используются и для хранения программ-трансляторов для перевода с алгоритмического языка на машинный.

Благодаря применению ПЗУ, оперативное ЗУ машины освобождается от хранения такого рода неизменной информации, емкость оперативного ЗУ может быть использована эффективнее, а это расширяет общие возможности машины. Особенно велика роль ПЗУ в информационно-логических машинах — переводческих, справочных, диагностических, телебиблиотеках и т. д.

Поскольку ПЗУ должны работать только в режиме считывания информации, то их схемные и конструктивные решения оказываются значительно более простыми, а значит, и более дешевыми и более надежными, чем у оперативных ЗУ той же емкости. Существенно также то обстоятельство, что информация, хранящаяся в ПЗУ, не теряется при сбоях или переходных процессах, возникающих, например, при включении или выключении питания.

Очень важной особенностью ПЗУ является возможность их работы с быстродействием на порядок выше, чем соответствующих оперативных ЗУ. Это достигается за счет того, что в них экономится время, которое в большинстве оперативных ЗУ затрачивается на регенерацию информации. Наконец, ПЗУ, как правило, имеют ме́ньшие габариты и потребляют ме́ньшую мощность, чем оперативные ЗУ соответствующей емкости.

В основе функционирования ПЗУ лежит принцип неразрушающего считывания информации. Таким образом, любые ЗУ с неразрушающим считыванием информации, например, ЗУ на магнитных лентах, барабанах и дисках могут быть использованы как ПЗУ. Трудно также провести четкую грань между оперативными

ЗУ с неразрушающим считыванием (на сердечниках с диаметральными отверстиями, трансфлюксорах, биаксах и др.) и ПЗУ. В этих случаях название ЗУ определяется не столько потенциальными свойствами запоминающих элементов, сколько способом их использования в ЗУ. Если нормальная эксплуатация ЗУ предусматривает только считывание ранее записанной информации, то соответствующее устройство мы будем называть постоянным. Если в процессе эксплуатации предусматривается также и замена тем или иным путем информации, записанной в ЗУ, то его называют полупостоянным ЗУ.

По способу замены информации описываемые ЗУ можно разделить на три основные группы:

1. Устройства, в процессе эксплуатации которых изменение записанной в них информации невозможно. К этим ЗУ лучше всего подходит один из вариантов названия ПЗУ — *фиксированные* ЗУ. Информация в них записывается при изготовлении и может быть изменена лишь путем нарушения их конструкции или перемонтажа схемы.

2. Устройства с *механической заменой информации (полупостоянные* ЗУ). Они предназначаются в процессе решения задачи только для считывания информации, но при необходимости изменение хранящихся в этих ЗУ данных может быть осуществлено без нарушения их целостности, а именно, путем предусмотренных конструкцией возможностей смены информации механическим путем (вручную или автоматически). Полупостоянные ЗУ находят, например, широкое применение в специализированных машинах при использовании их для управления различными производственными процессами. Набор новой программы в полупостоянном ЗУ позволяет использовать машину для управления новым процессом.

3. Устройства с *электрической перезаписью*. Эти ЗУ являются по своим свойствам промежуточными между оперативными и постоянными ЗУ. Они предназначаются, как правило, только для считывания информации, но при необходимости в них может быть записана электрическим путем новая информация. Учитывая, что такая перезапись осуществляется довольно редко, схемы записи могут быть весьма медленнодействующими, что практически не сказывается на общем быстродействии всей системы. Следовательно, ЗУ с электрической перезаписью представляют собой по сути дела оперативные ЗУ с неразрушающим считыванием и с существенно упрощенной системой записи информации.

В современных ЦВМ и схемах автоматического управления наибольшее распространение получили ПЗУ двух конструктивных типов.

Во-первых, в качестве накопителей ПЗУ широко применяются матричные схемы (сетки), образуемые пересекающимися рядами проводов — шинами, в точках пересечения которых могут быть расположены *элементы связи* между шинами. Такие ПЗУ могут

выполнять также роль кодирующих и декодирующих устройств (шифраторов и дешифраторов), преобразователей кодов из одной системы счисления в другую и других преобразователей информации, в основе которых лежит запоминание некоторой постоянной программы преобразования. В матричных сетках каждое пересечение шин используется, как правило, в качестве места запоминания одной двоичной цифры.

Значительно более экономичное использование запоминающих элементов и физического объема достигается в ПЗУ трансформаторного типа с повышенным коэффициентом информационного заполнения (с одним запоминающим элементом на несколько бит информации).

Дальнейшее изложение в настоящей главе посвящено описанию этих двух основных типов современных ПЗУ, а также описанию полупостоянных ЗУ, главным образом с механической заменой информации.

Такие специфические нестирающиеся носители информации, как перфокарты и перфоленты, которые также могут быть отнесены к категории ПЗУ, были описаны выше в гл. 3. Из методических соображений вынесено в гл. 13, посвященную оптическим и оптоэлектронным ЗУ, также и описание ЗУ на фотоносителях, являющихся специфическими ПЗУ.

14-2. Матричные постоянные запоминающие устройства

Принцип построения простейшего накопителя матричного ПЗУ иллюстрируется схемой рис. 14-1. При емкости N n-разрядных чисел матрица содержит N числовых шин (на рисунке — горизонтальные) и n разрядных шин (на рисунке — вертикальные), образующих так называемую *сетку*. В местах пересечения шин *(узлах сетки)* между ними включаются элементы связи *ЭС*, соответствующие наличию единицы в данных разрядах чисел, фиксируемых в ПЗУ. В качестве элементов связи могут применяться резисторные, емкостные, индуктивные и некоторые другие элементы. Эти элементы могут иметь линейные или нелинейные характеристики. Они могут быть в принципе как пассивными, так и активными (например, транзисторы, оптоэлектронные элементы и др.). Чаще всего в матричных ПЗУ применяются пассивные элементы.

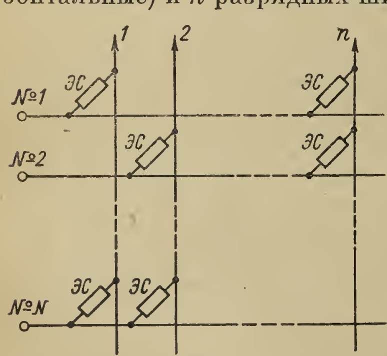


Рис. 14-1. Принцип построения накопителя матричного ПЗУ.

Сетка, показанная на рис. 14-1, содержит элементы связи только в узлах, где записываются единицы. Такую сетку назы-

вают *неполной*. Значительно реже применяют *полные сетки*, которые содержат элементы связи во всех узлах, но включенные по-разному в зависимости от того, нужно ли записывать «0» или «1». Например, при применении в качестве индуктивных элементов связи ферритовых сердечников их можно прошивать числовой или разрядной шиной в одном направлении при записи «0» и в другом направлении при записи «1», в результате чего при считывании получаются разнополярные импульсы.

В зависимости от характера и свойств элементов связи последние могут подключаться параллельно к числовой шине или последовательно в нее. При параллельном подключении, как показано на рис. 14-1, числовую шину можно назвать *потенциальной*. Если пренебречь ее активным сопротивлением, то можно считать, что потенциал вдоль всей шины при таком включении неизменен, а ток, протекающий по ней, убывает по мере удаления от входа.

В другом случае, например, при применении индуктивных элементов связи, последние прошиваются числовой шиной последовательно. Такую шину можно назвать *токовой*. На всем ее протяжении ток остается практически неизменным, а потенциал падает по мере удаления от входа. Достоинством ПЗУ матричного типа с токовыми числовыми шинами является возможность двусторонней дешифрации адреса, обеспечивающей экономию электронного оборудования [14-6].

Одним из важнейших параметров для оценки качества выбранной схемы ПЗУ с однополярными сигналами считывания является величина коэффициента дискриминации $k_д = U_{«1» мин} / U_{«0» макс}$, характеризующая надежность различения минимального полезного сигнала единицы и максимального сигнала помехи при считывании нуля.

Простое и дешевое матричное ПЗУ небольшой емкости можно построить на обычных линейных резисторах. Однако при увеличении емкости ПЗУ такого типа возрастает число путей паразитных переходов и величина отношения напряжений считывания «1» и «0» уменьшается. Правда, уменьшая нагрузочные сопротивления, можно компенсировать это уменьшение, но практически таким образом нельзя создать достаточно емкого и в то же время надежного ПЗУ, так как при значительном уменьшении сопротивлений нагрузки все считываемые напряжения становятся очень малыми и для их компенсации необходимо сильно повышать напряжение питания, что, в свою очередь, приводит к резкому возрастанию тепловых потерь в ПЗУ.

Вследствие указанных недостатков ПЗУ на линейных резисторах применяются редко, причем емкость их обычно не превышает нескольких десятков чисел.

Тем не менее разработка таких ПЗУ продолжается. Так, в 1965 г. было опубликовано описание ПЗУ на печатных резисторах [14-20]. Оно представляет собой полную сетку, в которой код записывается перфорацией печатных перемычек, соединяющих на

майларовой карте сопротивления с шинами возбуждения. Главным достоинством этого ПЗУ является его простота и низкая стоимость. В 1966 г. было описано подобное ПЗУ, в котором запись информации осуществляется выжиганием резисторов в разрядах, где должен быть записан «0» путем подачи соответствующих выжигающих напряжений на избранные шины [14-12]. В экспериментальной матрице этого ПЗУ размером 32×32 шины при сопротивлении резисторов 1 *ком* была достигнута рабочая частота обращений 500 *кгц*.

Значительно более широкое применение получили матричные ПЗУ, построенные на неполных сетках с нелинейными резисторными элементами связи, чаще всего с диодами. На рис. 14-2 изображено такое диодное ПЗУ емкостью пять шестиразрядных двоичных чисел. Запоминающими ячейками в данной схеме являются пять горизонтальных шин (№ *1—5*), а выходами считывания — зажимы *1—6* вертикальных шин (каждая на один разряд считываемого числа), замкнутые на нагрузочные сопротивления $R_н$. Наличие на выходном зажиме вертикальной шины положительного потенциала соответствует считыванию в данном разряде цифры 1, а отсутствие потенциала — цифры 0.

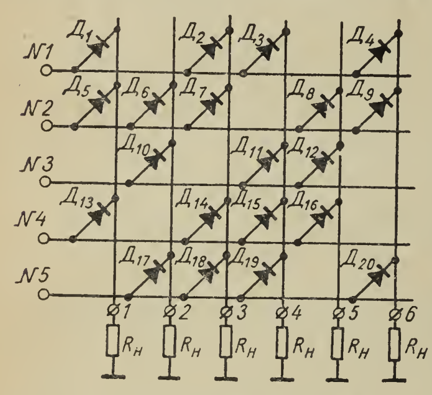


Рис. 14-2. Схема диодного матричного ПЗУ.

Для считывания числа, зафиксированного в некоторой запоминающей ячейке, нужно подать на соответствующую горизонтальную шину положительное напряжение. Так, например, при подаче напряжения на горизонтальную шину № *1* через диоды $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$ и $Д_4$ это напряжение появится на выходах *1*, *3*, *4* и *6*, что соответствует считыванию числа 101101. При подаче напряжения на вторую шину будет считано хранящееся в ячейке № *2* число 111011 и т. д.

Матричное ПЗУ подобного типа может быть выполнено и в качестве полупостоянного ЗУ, в котором зафиксированная информация может изменяться путем отключения или подключения диодов в узлах матрицы при помощи переключателей.

Такие ПЗУ просты, достаточно надежны, экономичны и позволяют осуществлять быстрое считывание информации — в течение микросекунд или долей микросекунды.

Благодаря односторонней проводимости диодов характеристики этого ПЗУ значительно лучше, чем у ПЗУ на линейных резисторах. Однако и оно не свободно от помех за счет возможных паразитных переходов, особенно сказывающихся при большой емкости ПЗУ. Например, при считывании информации из ячейки

№ *1* в идеальном случае на выходах *1*, *3*, *4* и *6* должно появиться полное напряжение питания U, а на выходах *2* и *5* напряжение должно быть равно нулю. Однако такие результаты могут быть получены лишь при условии, что сопротивление диодов в проводящем направлении $R_{\text{пр}} = 0$, а в непроводящем направлении $R_{\text{обр}} = \infty$. Так как практически $R_{\text{пр}} \neq 0$, а $R_{\text{обр}} \neq \infty$, то напряжение на зажимах, соответствующих считыванию «1», окажется меньше U, а на зажимах, соответствующих считыванию «0», появится некоторая помеха, обусловленная наличием значительного количества параллельных путей замыкания паразитных токов через обратное сопротивление диодов на выходы, где должны быть считаны нули. Все эти токи в нагрузке суммируются и создают на ней напряжение помехи $U_{\text{пом}}$, которое равно сумме напряжений помех, создаваемых каждым из паразитных токов:

$$U_{\text{пом}\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} U_{\text{пом}\,i}, \tag{14-1}$$

где $U_{\text{пом}\,i}$ — напряжение помех, создаваемое на выходе, где должен быть считан «0», за счет тока в i-й паразитной цепи, а n — количество таких паразитных цепей.

Естественно, что при большом количестве n цепей паразитных переходов напряжение $U_{\text{пом}\,\Sigma}$ на выходах, где должен быть считан «0», может оказаться значительным и достаточно близким к напряжению U_1 на выходах, где должна быть считана «1».

Следует отметить, что паразитные переходы, а следовательно, и помехи могут сильно возрастать при больших скоростях считывания очень короткими импульсами даже при применении диодов с очень большой величиной отношения $R_{\text{обр}}/R_{\text{пр}}$. Это объясняется тем, что при быстром нарастании напряжений начинает сильно сказываться емкостная проводимость диодов, одинаковая в обоих направлениях.

Диодные ПЗУ применяются для хранения небольших объемов информации — порядка десятков — сотен чисел.

Еще в середине 50-х годов в лаборатории электромоделирования Академии наук СССР под руководством Л. И. Гутенмахера [1-6] было разработано емкостное ПЗУ матричного типа на тонких бумажных листах толщиной около 100 *мкм* с двусторонними металлизированными покрытиями, образующими миниатюрные конденсаторы емкостью около 3 *пф*. Эти покрытия наносятся на листы печатным способом. Информация записывается на листах оставлением или выключением конденсаторов в узлах матрицы. В принятом лабораторией способе на листах печатаются конденсаторы во всех узлах матрицы, а для записи информации оператор путем перфорации обрабатывает соответствующие соединения пластин с шинами. После записи информации листы собираются в блоки и прессуются. Для длительного хранения блоки могут быть также герметизированы.

Аналогичное емкостное ПЗУ на 4032 60-разрядных чисел применено в американской машине ИБМ-360 [14-18].

Разработано также емкостное ПЗУ на основе проводниковой ткани, изготовляемой на ткацком станке, с управлением от перфокарт [14-1]. Однако, несмотря на высокую технологичность, это ПЗУ не получило распространения из-за низкого уровня выходного сигнала и невозможности исправления ошибок в записи информации после изготовления.

Среди матричных ПЗУ наиболее широкое применение в качестве фиксированных и, главным образом, в качестве полупостоянных ЗУ нашли устройства с индуктивными связями. Роль элементов связи в них могут исполнять витки или соленоиды без сердечника, ферромагнитные тороидальные элементы с обмотками, ферритовые стержни, элементы сложной конфигурации.

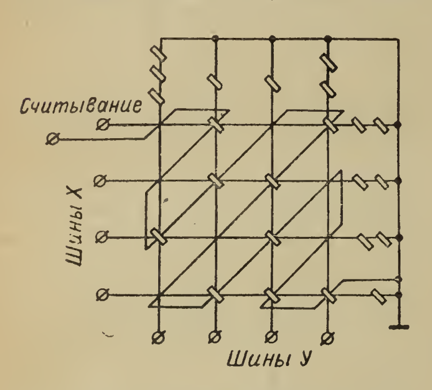


Рис. 14-3. Разрядная матрица постоянного трехмерного ЗУ.

Элементарно простой логический путь создания ПЗУ заключается в соответствующем преобразовании оперативного ЗУ. Для этого в последнем нужно, во-первых, удалить сердечники во всех разрядах, где должен быть записан «0», и, во-вторых, изменить схему управления путем исключения из нее всех элементов, связанных с записью информации и ее регенерацией после считывания.

Схема разрядной матрицы ПЗУ на 16 чисел, полученного в результате таких преобразований из оперативного ЗУ с совпадением двух токов, показана на рис. 14-3. Поскольку количество сердечников, предназначенных для фиксации информации и прошитых шинами возбуждения X и $У$, здесь различно в различных столбцах и строках матрицы, то для выравнивания полного входного сопротивления шин X и $У$ на каждую из них вне матрицы нанизаны компенсирующие сердечники в количестве, равном количеству сердечников, удаленных с этой шины из узлов матрицы.

Во всех оставшихся в матрице сердечниках записана «1». Считывание информации из такого ЗУ осуществляется обычным методом совпадения двух токов, причем происходит перемагничивание соответствующих сердечников в состояние «0». Следовательно, в ЗУ должна быть предусмотрена регенерация состояния сердечников при считывании. Однако, так как регенерироваться должна всегда «1», и во всех сердечниках считанной числовой ячейки, то задача регенерации чрезвычайно упрощается. Для этой цели просто можно применить считывание двухполярными импульсами; первый импульс будет перемагничивать сердечники

из состояния «1» в «0», а второй — другой полярности — восстанавливать в них состояние «1».

Другое решение вопроса может заключаться в применении специальной восстанавливающей обмотки, пронизывающей все сердечники и возвращающей их всегда в состояние «1». В этом случае считывание можно производить однополярными импульсами, которые будут перемагничивать сердечники в состояние «0», а после считывания ток восстанавливающей обмотки будет возвращать их в состояние «1».

ПЗУ можно строить также на основе схемы двухмерного ЗУ. Как и в обычной схеме ЗУ здесь могут быть применены по два сердечника на разряд для получения разнополярных сигналов считывания «0» и «1». Однако основная цель применения двух сердечников на разряд, а именно, компенсация нагрузки при считывании различных кодов в ПЗУ отсутствует, так как во всех запоминающих сердечниках записана «1», а вместо сердечников, удаленных из тех разрядов числовой ячейки, где должен быть записан «0», числовая шина нагружается соответствующим количеством компенсационных (не прошитых выходными обмотками) сердечников, в которых также всегда записывается «1». Это позволяет без ущерба для работоспособности строить двухмерные ПЗУ с одним сердечником на разряд.

В одной из эксплуатируемых машин БЭСМ-2 используется ПЗУ емкостью 256 39-разрядных чисел, построенное на двух стандартных платах оперативного двухмерного ЗУ этой машины [14-8]. Постоянная запись «1» или «0» осуществлена здесь устранением в соответствующих разрядах либо запоминающего, либо компенсирующего сердечника. В результате сигналы считывания получаются двухполярными, хотя и несколько ме́ньшей амплитуды. Для управления этим ПЗУ используются те же электронные схемы, что и для оперативного ЗУ, лишь с некоторыми дополнениями.

Наряду с использованием для хранения постоянной информации соответствующим образом реконструированных накопителей магнитных оперативных ЗУ в течение последнего десятилетия было предложено большое количество специальных конструкций матричных ПЗУ с индуктивными элементами связи. Многие из этих конструкций предусматривают возможность механической смены информации, т. е. использования их в качестве полупостоянных ЗУ.

Одним из типов таких устройств являются ЗУ на ферритовых стержнях, различные варианты которых предложены в СССР [14-5], Англии и ФРГ [1-11].

В основу этого устройства положен принцип изменения коэффициента взаимоиндукции между обмотками запоминающего элемента путем введения в них общего ферромагнитного сердечника. Запоминающий элемент содержит две обмотки и ферритовый стержень, который может находиться либо вне обмоток (рис. 14-4, *а*),

либо внутри обмоток, связывая их между собой общим магнитопроводом (рис. 14-4, *б*). Э. д. с., индуктируемая во второй катушке при пропускании тока i в первой катушке, будет в первом случае

$$e_0 = -M_0 \frac{di}{dt}, \qquad (14\text{-}2)$$

во втором случае

$$e_1 = -M_1 \frac{di}{dt}, \qquad (14\text{-}3)$$

причем, очевидно, $M_0 < M_1$.

Принимая условно величину э. д. с. во второй катушке e_1 за сигнал считывания «1», а e_0 — за помеху при считывании «0», можно построить полупостоянное ЗУ по схеме, изображенной на

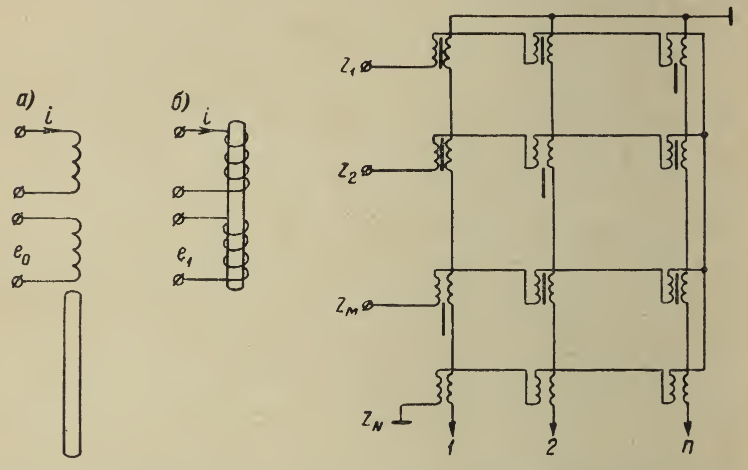


Рис. 14-4. Принцип фиксации информации при помощи ферритовых стержней: *а* — запись «0»; *б* — запись «1».

Рис. 14-5. Принципиальная схема матрицы полупостоянного ЗУ с ферритовыми стержнями.

рис. 14-5, где N горизонтальных шин соответствуют N записываемым числам, а n вертикальных шин — количеству разрядов в числах. Коэффициент дискриминации $k_д = e_1/e_0$ достигает в описываемом устройстве 20 [14-5].

Для облегчения процесса изменения записанной информации в устройстве применена специальная конструкция, обеспечивающая установку ферритовых стержней в нужное положение при помощи сжатого воздуха в соответствии с расположением отверстий в специально подготовленных перфокартах.

Тот же принцип работы полупостоянного ЗУ применен в устройстве, разработанном в Манчестерском университете в Англии, которое нашло практическое применение в большой английской вычислительной машине «Атлас», построенной фирмой «Ферранти».

Ряд типов полупостоянных ЗУ с индуктивной связью был разработан на твисторах [1-11].

В Японии предложена конструкция полупостоянного ЗУ на цилиндрических магнитных пленках [14-22]. Схематическая конструкция этого ЗУ показана на рис. 14-6. Постоянный ток I_0, все время протекающий по осевому проводнику (разрядной шине) от источника E_0, создает магнитное поле в одном из направлений легкого намагничивания. В тех разрядах, где должна быть записана «1», в местах пересечения разрядной шины и числовой шины опроса помещаются информационные постоянные магнитики, создающие магнитное поле, направленное вдоль оси трудного намагничивания цилиндрической пленки.

При опросе импульсом тока $I_{опр}$, если в соответствующем элементе связи отсутствует магнитик, то как в обычном пленочном ЗУ, на выходе появляется сигнал считывания $U_{вых}$, полярность которого определяется направлением постоянного тока I_0. При наличии магнитика, создающего магнитное поле, равное по величине и противоположное по направлению полю опросного тока $I_{опр}$, на выходе возникает сигнал считывания $U_{вых}$ той же величины, но противоположного знака.

Рис. 14-6. Схематическая конструкция полупостоянного ЗУ на цилиндрических магнитных пленках.

1 — проводник, покрытый цилиндрической магнитной пленкой (разрядная шина); *2* — направление легкого намагничивания; *3* — числовая шина опроса; *4* — постоянный магнитик.

Информационные магнитики могут укрепляться на сменных картах. Такое полупостоянное ЗУ обеспечивает значительно бо́льшие сигналы считывания, лучшее отношение сигнал/помеха и нечувствительность к внешним магнитным полям по сравнению с обычным ЗУ на тонких магнитных пленках с неразрушающим считыванием.

Разработано несколько вариантов полупостоянных ЗУ с индуктивной связью, осуществляемой без специальных ферромагнитных элементов. Запись информации в таких ЗУ производится изменением связи между шинами возбуждения и считывания за счет реализуемой тем или иным способом перфорации металлизированных экранов, расположенных между шинами [14-2, 14-10, 14-11 и др.].

Так, на рис. 14-7 изображен элемент связи полупостоянного ЗУ с экранирующей металлизированной перфокартой, закладываемой между числовыми шинами опроса и разрядными шинами считывания. В местах, где должна быть записана «1», карта перфорируется, а в местах записи «0» сохраняется ее целостность. Это обеспечивает значительное различие по амплитуде сигналов считывания «1» и «0».

В другом варианте полупостоянного ЗУ используется явление вихревых токов (рис. 14-8), возникающих в кольце из латунной фольги и усиливающих связь между шинами опроса и считывания. При записи «0» кольцо перфорируется, причем резко ослабляется индуктивная связь между шинами.

Предложен ряд других вариантов полупостоянных ЗУ, основанных на изменении степени индуктивной связи в местах переключения шин опроса и считывания. Например, в одном из полупо-

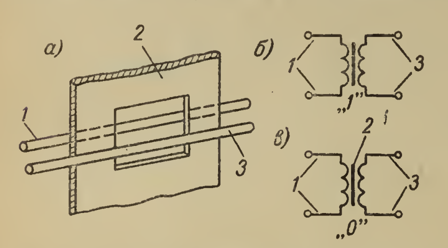
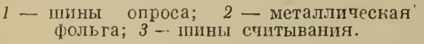


Рис. 14-7. Элементы связи в устройстве с перфорированными экранирующими картами: *а* — конструкция элемента; *б* — запись «1»; *в* — запись «0».


1 — шины опроса; 2 — металлическая фольга; 3 — шины считывания.

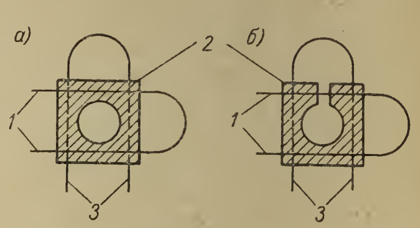


Рис. 14-8. Элемент связи с использованием вихревых токов: *а* — запись «1»; *б* — запись «0».

1 — шины опроса; 2 — металлическая фольга; 3 — шины считывания.

стоянных ЗУ [14-2] в элементах связи используются печатные индуктивности в виде спирали, содержащей несколько витков квадратной формы. В другом ЗУ [14-19] элементы связи образуются двумя концентрическими десятивитковыми соленоидами диаметром 0,325 *мм* и длиной 2 *мм*. В этом устройстве при опросе импульсами тока с амплитудой около 125 *ма* получаются сигналы считывания не менее 15 *мв* и обеспечивается работа со временем полного цикла, не превышающим 150 *нсек*.

14-3. Устройства с повышенным информационным заполнением сердечников

Стремление к созданию компактных, малогабаритных и экономичных ПЗУ привело к разработке ряда вариантов схем на ферромагнитных сердечниках, в которых количество запоминающих элементов (сердечников) значительно меньше общей емкости ПЗУ в битах. Информационное заполнение сердечников в таких схемах достигает десятков, сотен и даже тысяч бит на сердечник.

Фиксация информации в этих ПЗУ достигается механическим путем — определенной системой прошивки сердечников. Поэтому для изменения записанной в ПЗУ информации необходимо заново осуществить ее монтаж.

В ПЗУ описываемого типа можно применять как ферритовые сердечники с ППГ, так и сердечники с непрямоугольной петлей гистерезиса, например, оксиферовые, работающие как линейные

трансформаторы. Разница заключается лишь в том, что при использовании сердечников с ППГ надо предусмотреть восстановление исходного состояния запоминающих сердечников путем подачи специальных импульсов восстановления или посредством подмагничивания постоянным током. В соответствии с принципом действия ПЗУ на ферромагнитных сердечниках часто называют ПЗУ трансформаторного типа.

Принцип использования одного сердечника для хранения нескольких двоичных цифр реализуется двумя различными способами. Эти способы поясняются схемами рис. 14-9 на примере ПЗУ, в котором записаны следующие три четырехразрядных числа: 0101, 0001, 1011.

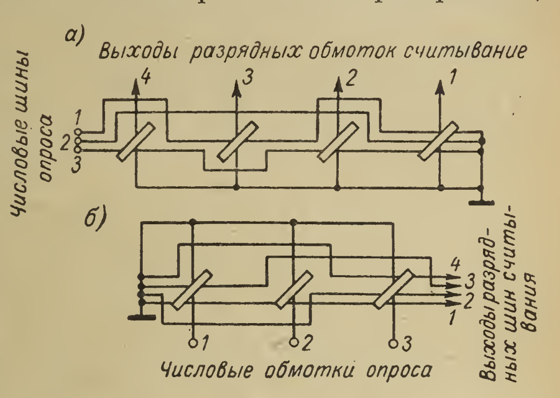


Рис. 14-9. Принципиальные схемы ПЗУ емкостью в три четырехразрядных числа: *а* — сердечники используются для хранения одинаковых разрядов всех чисел; *б* — сердечники используются для хранения всех разрядов одного числа.

В одном варианте ПЗУ с записью первичными обмотками (рис. 14-9, *а*) каждый сердечник предназначается для запоминания определенного разряда всех чисел и имеет свою разрядную выходную обмотку. Таким образом, числовая ячейка, предназначенная для фиксации N n-разрядных чисел, содержит n разрядных сердечников с соответствующими каждому из них выходными обмотками и N числовых проводов, пронизывающих сердечники тех разрядов, в которых должна быть записана «1», и проходящих мимо сердечников тех разрядов, где в данном числе записан «0». Очевидно, что при возбуждении выбранного числового проводника в выходных обмотках прошитых им сердечников возникают импульсы, образующие код считываемого числа.

Другое решение ПЗУ с записью вторичными обмотками (рис. 14-9, *б*) заключается в том, что линейка ПЗУ образуется из N числовых сердечников с соответствующими каждому из них числовыми обмотками возбуждения. Сердечники прошиваются n общими для всей линейки разрядными проводниками, причем эти проводники пропускаются через числовые сердечники, если в данных разрядах соответствующих чисел фиксируется «1», и минуют числовые сердечники, если в данных разрядах соответствующих чисел должен быть записан «0».

Таким образом, если в первом варианте имеется один провод на каждое число и один сердечник на двоичный разряд, то во втором

варианте приходится один сердечник на число и один провод на двоичный разряд.

В обоих вариантах одной из основных проблем при разработке ПЗУ является устранение прямых взаимных наводок между проводниками, образующими жгут длиной, равной длине линейки ПЗУ. Кстати, ПЗУ описанного типа называют иногда еще *жгутовыми* ПЗУ.

В случае, когда необходимо изменить содержимое той или иной числовой ячейки, в первом варианте соответствующий ей числовой проводник может быть выдернут из жгута или обрезан и заменен другим проводником, пронизывающим сердечники в соответствии с кодом нового числа. Таким образом, изменение кодов чисел в запоминающих ячейках оказывается принципиально возможным, но оно связано с большими трудностями чисто монтажного характера. Во втором варианте для изменения содержимого одной из числовых ячеек требуется произвести полный перемонтаж всего ПЗУ.

Подавляющее большинство практически реализованных жгутовых ПЗУ выполнено по первому варианту, т. е. с отдельным сердечником на каждый разряд многих чисел. Анализ причин, ограничивающих емкость жгутовых ПЗУ, показывает, что кроме чисто монтажных ограничений, обусловленных площадью отверстия сердечника, количество проводов ограничивается и соображениями, связанными с электромагнитными процессами. Дело в том, что при возбуждении какого-либо числового провода во всех остальных проводниках индуктируются токи, которые по законам электромагнитной индукции создают реакцию, противодействующую переключению соответствующих сердечников. Поскольку же все эти вторичные цепи можно рассматривать как параллельный пучок проводов, естественно, что влияние этой реакции возрастает по мере увеличения количества числовых проводов. Для снижения этого влияния часто принимаются специальные меры, например, включение в конце каждого из числовых проводов диода, препятствующего протеканию вторичных токов в обратном направлении.

Так как в ПЗУ, построенном на сердечниках с ППГ, состояние их при считывании изменяется, то необходимо применять различные способы восстановления их исходного состояния в течение каждого цикла обращения.

Более широкое распространение получили в последние годы ПЗУ трансформаторного типа на сердечниках с непрямоугольной петлей гистерезиса. В этих ПЗУ значительное улучшение электрических характеристик может быть достигнуто благодаря применению более совершенных методов прошивки разрядных сердечников числовыми шинами.

На рис. 14-10 представлены шесть различных методов прошивки на примере двух разрядных сердечников, в одном из которых записана «1», а в другом — «0». Первый метод прошивки однопроводной

числовой шиной (рис. 14-10, *а*) представляет собой уже рассмотренный выше обычный способ типа «прошито — не прошито».

На рис. 14-10, *б* показан метод однопроводной прошивки, отличающийся тем, что числовой проводник здесь не минует сердечники, в которых записывается «0», а пронизывает их в обратном направлении. При считывании в выходной обмотке такого разрядного сердечника будет индуктироваться сигнал противоположной полярности, что улучшает распознаваемость считываемой информации. Кроме того, этим обеспечивается равномерная нагрузка на формирователи опросных импульсов, так как количество прошитых числовой шиной сердечников зависит от записанной информации и всегда постоянно. Однако при этом, естественно, усложняется монтаж.

Значительного снижения паразитных наводок в неизбранных числовых шинах можно добиться, применяя двухпроводные (бифилярные) числовые шины. При этом монтаж числовой линейки может быть осуществлен также различными способами. Так, на рис. 14-10, *в* и *г* показаны способы, которые в электромагнитном отношении можно считать аналогичными способу «прошито — не прошито» (рис. 14-10, *а*). Наконец, на рис. 14-10, *д* и *е* представлены способы, которые являются аналогами способа «прошито в одном направлении — прошито в другом направлении» (рис. 14-10, *б*), причем в последнем случае используется м. д. с., создаваемая токами обоих проводов бифилярной шины.

Рис. 14-10. Варианты прошивки разрядных сердечников трансформаторного ПЗУ: *а* и *б* — варианты однопроводной прошивки; *в*, *г*, *д* и *е* — варианты двухпроводной (бифилярной) прошивки.

Если добиться достаточного с практической точки зрения снижения паразитных наводок и помех, то, в конечном счете, емкость ПЗУ, выраженная количеством фиксируемых чисел N, определяется количеством проводников приемлемого диаметра, которые могут быть уложены при монтаже в окне сердечника выбранных размеров. Требуемая емкость ПЗУ достигает тысяч, десятков тысяч и более чисел, но конструктивные ограничения затрудняют монтаж числовых линеек емкостью более нескольких сотен или, в лучшем случае, нескольких тысяч чисел. Поэтому при построении ПЗУ большой емкости приходится объединять несколько числовых линеек в общий числовой блок ПЗУ.

Следует отметить, что если числовые шины, пропускаемые через сердечники, выполняют, как правило, роль одновитковых обмоток,

то разрядные выходные обмотки для получения сигнала достаточной амплитуды делают обычно многовитковыми. Это обстоятельство надо учитывать при определении емкости ПЗУ, исходя из заполнения окна сердечника.

В процессе монтажа числовой линейки при прошивке сердечников приходится многократно изменять их пространственную ориентацию, что приводит иногда к обрыву проводников. Этого можно избежать, если использовать в качестве элементов ПЗУ не тороидальные, а разъемные П-образные или Ш-образные сердечники (рис. 14-11) со съемной верхней полкой, которая закрепляется на месте лишь после окончания монтажа числовой линейки.

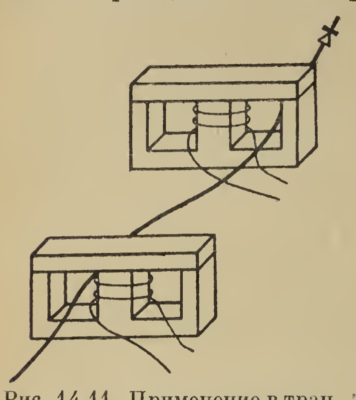


Рис. 14-11. Применение в трансформаторном ЗУ Ш-образных сердечников.

За последние годы большое внимание уделяется вопросам автоматизации изготовления жгутов для трансформаторных ПЗУ, причем в этой области достигнуты значительные успехи. Например, в лаборатории Массачусетского технологического института (США) разработана система изготовления ПЗУ трансформаторного типа на жаккардовых ткацких станках с управлением программой, записанной на перфокартах [14-3]. Таким образом, было, в частности, изготовлено ПЗУ емкостью 32768 16-разрядных чисел в виде 16 числовых линеек, каждая из которых содержала жгут из 2048 числовых шин, прошивающих 16 *U*-образных сердечников.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

15-1. Общие сведения о схемах управления

Показатели, которыми характеризуются современные ЗУ, определяются не только и даже не столько параметрами самих запоминающих элементов, из которых скомпонован собственно блок памяти ЗУ (накопитель), сколько электронными схемами, предназначенными для выбора запоминающей ячейки по заданному адресу, возбуждения соответствующих шин или обмоток и, наконец, усиления кодовых импульсов извлеченной из ЗУ информации. Для наименования всех этих электронных схем, или, как их часто называют на практике, электроники ЗУ, будет дальше применяться обобщающее название — *схема управления* ЗУ. При этом следует помнить, что в таком определении схема управления ЗУ включает

в себя как адресную часть, схемы ввода, вывода и перезаписи чисел, так и блок синхронизации, часто именуемый блоком управления, который обеспечивает реализацию заданной временно́й последовательности всех остальных блоков ЗУ.

Схемами управления в значительной степени определяются такие важнейшие технические показатели ЗУ, как быстродействие и информационная емкость. Дело в том, что современные достижения физики и техники позволили создать ферромагнитные элементы с временем перемагничивания порядка десятых долей микросекунды (сердечники и пластины) и даже единиц и десятков наносекунд (тонкие магнитные пленки). Однако создание адресных и переключающих схем, формирователей и усилителей, которые обеспечивали бы достаточно быстрый доступ к любой ячейке памяти и управление ею, оказывается весьма сложной и трудной задачей, ограничивающей емкость современных оперативных ЗУ десятками или сотнями тысяч слов и полный цикл обращения — временем порядка единиц или, в лучшем случае, десятых долей микросекунды.

Физический объем и стоимость схемы управления обычно во много раз превосходят объем и стоимость накопителя, хотя в современных ЗУ очень большой емкости (порядка миллионов бит или более) стоимость накопителя в ряде случаев становится выше стоимости периферийного оборудования. Если далее учесть значительную конструктивную и функциональную сложность схемы управления, то становится ясным ее важное значение для оценки стоимости, габаритов и надежности ЗУ в целом.

Таким образом, надлежащее теоретическое и техническое решение и практическое выполнение всего комплекса блоков ЗУ, объединяемых понятием схемы управления, может обеспечить наиболее полную реализацию потенциальных возможностей запоминающих элементов и создание достаточно быстродействующего, емкого, малогабаритного, экономичного и надежного ЗУ.

Независимо от используемых в накопителе запоминающих элементов (простые или многоотверстные ферритовые сердечники, многоотверстные пластины, биаксы, тонкие магнитные пленки) общие принципы построения схем управления ЗУ остаются неизменными, хотя конкретные требования к амплитуде и временны́м характеристикам соответствующих импульсов управления зависят от типа запоминающих элементов.

Рассмотрим блок-схему ЗУ более подробно, чем это было сделано в § 6-1.

Типичная блок-схема ЗУ с произвольной выборкой представлена на рис. 15-1. Рассмотрим прежде всего адресную часть блок-схемы, которая предназначается для выбора по заданному адресу той или иной числовой ячейки памяти, в которой должна быть произведена запись или считывание информации.

Адрес требуемой числовой ячейки в двоичном коде поступает с кодовы́х шин адреса машины *КША* в регистр адреса *РА* и фикси-

руется в нем до окончания дешифрации адреса. При емкости ЗУ в m чисел разрядность кода адреса $n_А$ определяется выражением $n_А = \log_2 m$. Следовательно, регистр адреса должен содержать $n_А$ двоичных элементов, как правило, транзисторных триггеров. Перед приемом кода адреса триггеры регистра адреса могут переключаться в состояние «0» специальным импульсом, поступающим из блока управления *БУ*.

Преобразование двоичного кода адреса в импульсы возбуждения соответствующих селектирующих шин запоминающих матриц трехмерного ЗУ или шин сетки координатных трансформаторов (магнитных ключей) в двухмерном ЗУ обеспечивается дешифраторами $Д_X$ и $Д_Y$. В трехмерных ЗУ большой емкости, разрабатываемых в последние годы, после ключей размещаются мощные формирователи, которые можно считать элементами дешифратора оконечной ступени. В двухмерных ЗУ дешифратор оконечной ступени чаще всего конструктивно объединяется с накопителем *Н*. Код регистра адреса может поступать к дешифраторам в зависимости от типа и схемы последних, в потенциальной или импульсной форме, непосредственно или через усилители *У*.

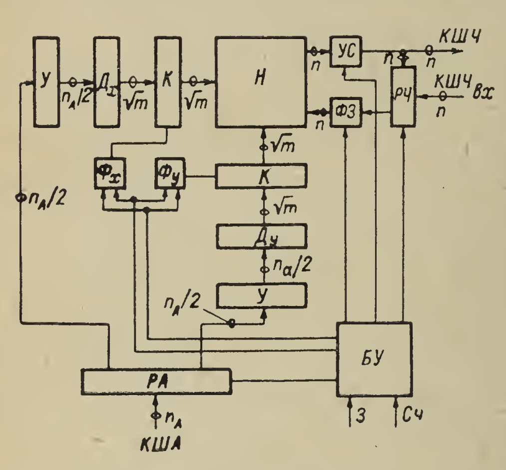


Рис. 15-1. Блок-схема ЗУ.

Напряжения с выходов дешифраторов (количество выходов соответствует количеству селектирующих шин) используются для управления схемой коммутации *К*, состоящей из ключей, которые пропускают или не пропускают в селектирующие шины накопителя *Н* импульсы тока возбуждения, вырабатываемые формирователями (генераторами) $Ф_X$ и $Ф_Y$. В одном случае, как показано на рис. 15-1, каждый из формирователей предназначается для возбуждения всех шин X и всех шин Y через соответствующие ключи. В другом случае для возбуждения каждой шины предназначается свой отдельный формирователь, причем управление формирователями осуществляется непосредственно потенциалами или импульсами, снимаемыми с выходов дешифраторов. Еще один возможный вариант возбуждения шин дешифратора оконечной ступени, построенного, например, на диодах или транзисторах заключается в том, что выбор необходимой шины X осуществляется возбуждением соответствующего формирователя, а шины Y — открыванием включенного на выходе этой шины ключа.

Считанные из накопителя сигналы усиливаются усилителями считывания *УС* и поступают на кодовые шины числа машины *КШЧ* и параллельно — в регистр чисел *РЧ* для перезаписи. Если же в числовую ячейку, из которой только что была считана информация, нужно записать новое число, то оно поступает в *РЧ* с входных кодовых шин числа $КШЧ_{вх}$.

Код записываемого вновь или перезаписываемого числа из регистра чисел поступает в формирователи разрядных токов записи или запрета записи *ФЗ* (в соответствии с принятой в данном ЗУ схемой записи) и далее — в разрядные шины записи.

В современных ЗУ высокого быстродействия с целью экономии времени и количества оборудования регистр адреса и регистр числа могут отсутствовать. При этом код адреса подается на дешифратор непосредственно с регистра команд, а код числа — из арифметического устройства.

Надлежащая временна́я последовательность выполнения функций отдельных блоков ЗУ осуществляется блоком синхронизации или управления *БУ*. В соответствии с поступающими в него из машины командами — «запись» (*З*) или «считывание» (*Сч*) блок управления вырабатывает необходимые импульсы управления. Он обеспечивает своевременную очистку (гашение) регистров адреса и числа, запуск формирователей селектирующих токов, стробирование усилителей считывания, синхронизацию импульсов, выдаваемых формирователями записи.

В тех случаях, когда соединения между блоками на схеме рис. 15-1 осуществляются не одним проводом, а жгутом проводов, соединительная линия охвачена на рисунке кольцом, у которого обозначено количество проводов (шин) в жгуте. При этом m обозначает емкость ЗУ в числах, n — разрядность чисел и $n_А$ — разрядность кодов адреса.

Ниже в настоящей главе приводится описание лишь некоторых элементов блок-схемы управления ЗУ. Так, совсем не рассматриваются регистры и вспомогательные элементы, обладающие неспецифичными для ЗУ характеристиками. Особое внимание уделяется дешифраторам и усилителям считывания, играющим весьма важную роль для работоспособности ЗУ.

При проектировании схем управления ЗУ важным моментом является согласование отдельных элементов схемы между собой. В частности, должны быть согласованы между собой выходы и входы дешифраторов первой и второй ступеней, формирователи, шины накопителя, входы усилителей считывания. Это согласование должно обеспечить как оптимальные условия отдачи мощности для переключения запоминающих элементов, так и быстрое успокоение волновых процессов в шинах накопителя.

Учитывая большое разнообразие применяемых типов накопителей, дешифраторов, формирователей и усилителей считывания, практически невозможно применять универсальные методы расчета, пригодные для оптимального согласования столь разнообраз-

ных элементов схем управления ЗУ. Поэтому в каждом случае проектирования конкретного ЗУ приходится, пользуясь общими электротехническими методами согласования энергетических и временны́х характеристик элементов и блоков между собой, решать соответствующие задачи применительно к конкретным условиям и схемам.

15-2. Адресная часть

Адресная часть схемы управления служит для выбора числовых линеек накопителя в соответствии с их адресом и является неотъемлемым блоком каждого ЗУ с произвольной выборкой информации. Обычно количество оборудования адресной части составляет 30 ÷ 40% и более всей схемы управления ЗУ, а время дешифрации — 20 ÷ 50% времени обращения к ЗУ.

Адресная часть характеризуется теми же параметрами, что и вся схема управления ЗУ (быстродействие, надежность, экономичность и т. д.). Дешифраторы характеризуют обычно количеством входов и выходов, временем дешифрации $\tau_А$ — от момента подачи

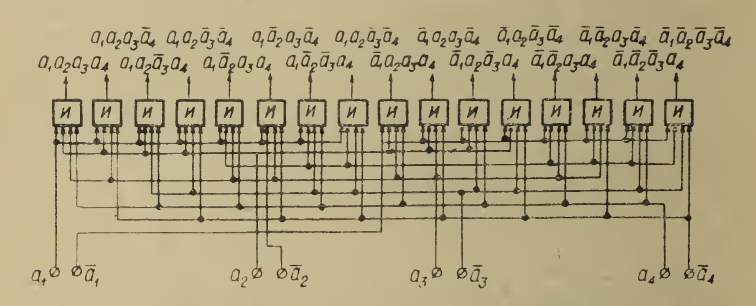


Рис. 15-2. Матричная структурная схема дешифратора.

кода адреса на вход дешифратора до момента, когда амплитуда сигнала на выбранной шине достигает определенной величины, и отношением сигнал/помеха k — отношением амплитуд напряжения на выбранной ($U_в$) и невыбранной ($U_н$) шинах.

Адресная часть состоит из регистра адреса, дешифраторов X и Y, формирователей, ключей и дешифратора оконечной ступени. Эти узлы выполняют различные функции и могут строиться на различных элементах. Поэтому каждый узел можно рассмотреть отдельно.

Дешифратор является функциональным узлом, который состоит из ряда идентичных логических элементов, соединенных между собой в определенном порядке.

Дешифрация заключается в возбуждении одного из m выходов устройства при подаче на вход $n_А$-разрядного двоичного кода (обычно в ЗУ $m = 2^{n_А}$).

Чаще всего дешифраторы состоят из набора схем совпадения «И».

В зависимости от того, из каких элементов состоит и какими параметрами должен обладать дешифратор, он может быть построен по той или иной структурной схеме. Получили распространение дешифраторы, построенные по матричной, пирамидальной и ступенчатой схемам.

Матричная схема состоит из $M = m = 2^{n_А}$ схем совпадения, каждая из которых имеет $n_А$ входов (рис. 15-2).

Способ построения пирамидальной схемы дешифратора поясняется рис. 15-3. Здесь количество схем совпадения $M = 2^{n_А+1} - 4$, причем каждая схема совпадения имеет два входа и работает на

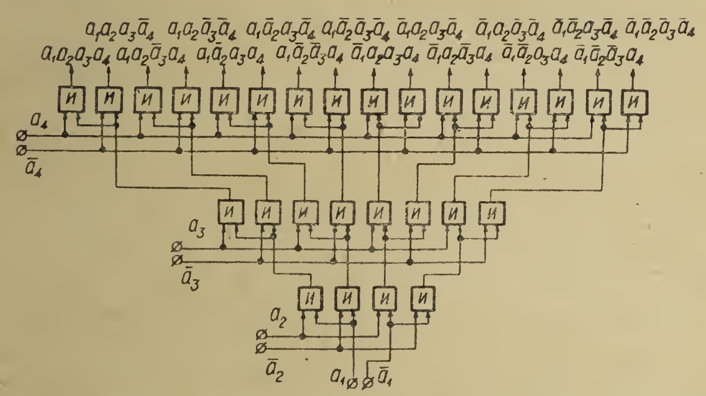


Рис. 15-3. Пирамидальная структурная схема дешифратора.

два таких же элемента. Дешифратор, построенный по пирамидальной схеме, создает неравномерную нагрузку на различные разряды регистра адреса, если в младшем разряде выход элемента нагружен двумя схемами совпадения, то в старшем — $2^{n_А-1}$ схемами.

Один из вариантов построения ступенчатой схемы показан на рис. 15-4. Эта схема имеет две ступени, причем все входы дешифратора распределяются поровну между двумя матричными дешифраторами первой ступени, если число входов $n_А$ нечетное, один матричный дешифратор первой ступени имеет $(n_А + 1)/2$ входов, другой — $(n_А - 1)/2$. Количество схем совпадения определяется по формуле: $M = 2^{\frac{n_A-1}{2}}\left(2^{\frac{n_A+1}{2}} + 2\right)$ при $n_А$ — четном,

или $M = 2^{\frac{n_A-1}{2}}\left(2^{\frac{n_A+1}{2}} + 3\right)$ при $n_А$ — нечетном.

Каждая схема совпадения первой ступени имеет $n_А/2$ выходов и нагружена $2^{\frac{n_A}{2}}$ схемами совпадения второй ступени, а если $n_А$ — нечетное, каждая схема совпадения одного матричного дешифратора

имеет $(n_A + 1)/2$ входов и нагружена $2^{\frac{n_A - 1}{2}}$ подобными схемами, другого — $(n_A - 1)/2$ входов и нагружена $2^{\frac{n_A + 1}{2}}$ элементами второй ступени. Все схемы совпадения второй ступени имеют по два входа.

Рассмотрим основные элементы, на которых строятся или которые являются перспективными для построения дешифраторов ЗУ.

Дешифраторы, построенные на схемах совпадения на ферритовых сердечниках, характеризуются высокой надежностью. Они обычно строятся по матричной структурной схеме. Известно большое количество различных модификаций дешифраторов на ферритовых сердечниках с ППГ, позволяющих уменьшить число входных формирователей [15-19, 15-27], которое в простейшем случае равно $(2n_A + 2)$. Такие дешифраторы являются экономичными с точки зрения количества используемого оборудования, учитывая достаточно низкую стоимость ферритовых сердечников по сравнению с другими элементами.

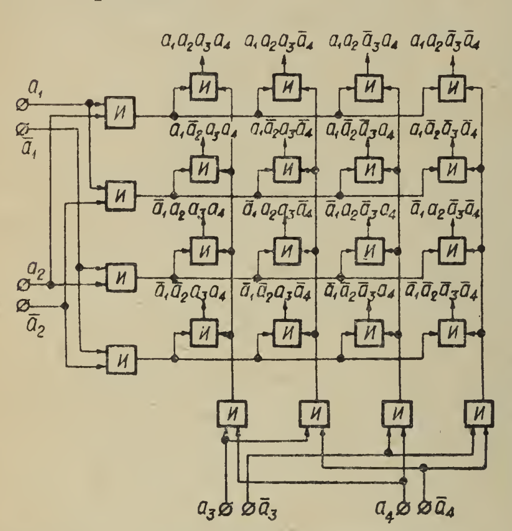


Рис. 15-4. Схема ступенчатого дешифратора.

Однако эти дешифраторы имеют существенные недостатки: низкий к. п. д. и небольшое быстродействие. Последнее обстоятельство связано в основном с саморазогревом сердечника, что приводит к существенному изменению параметров. Поэтому дешифраторы на ферритовых сердечниках с ППГ находят применение в ЗУ с полным циклом более 5—6 *мксек* (ЦВМ «БЭСМ», «Киев» и др.).

Дешифраторы ЗУ могут быть построены на диодно-трансформаторных вентилях. Однако ввиду значительных потерь при прохождении сигнала через такие вентили и наличие помех, достигающих величины 5% и более от амплитуды выходного сигнала, эти дешифраторы требуют установки промежуточных усилителей мощности на транзисторах, что приводит к значительному увеличению количества оборудования. В известных устройствах [15-15] время дешифрации диодно-трансформаторных дешифраторов составляет более 2 *мксек*.

Широкое распространение получили диодные дешифраторы. Быстродействие схем совпадения на диодах определяется такими параметрами, как сопротивление развязки, прямое сопротивление диодов, емкости диодов, монтажа и нагрузки. Анализу количества элементов и вопросам расчета диодного дешифратора посвящены работы [15-8, 15-9]. В работе [15-13] рассматриваются возможности уменьшения количества диодов в дешифраторах за счет применения особых двухвходовых схем совпадения с одним диодом.

Тактовая частота работы обычных диодных дешифраторов ограничивается 200—300 *кгц*. Однако применение некоторых методов форсирования, в частности подкачки электрической энергии в дешифратор во время переходного процесса [15-4], переменного развязывающего сопротивления [15-16] и др. позволяет довести тактовую частоту диодных дешифраторов до 5 *Мгц* [15-17].

Дальнейшее повышение быстродействия может быть достигнуто при построении дешифраторов на транзисторных схемах совпадения. С целью уменьшения количества транзисторов, такие дешифраторы, так же как и диодные, рационально строить по ступенчатой структурной схеме.

Экспериментальная проверка транзисторных дешифраторов с непосредственными и реостатно-емкостными связями показала, что их быстродействие определяется, в основном, предельной частотой работы транзисторов и достигает нескольких мегагерц. Отношение сигнал/помеха таких дешифраторов составляет $k = 30 \div 50$.

В настоящее время ставится задача построения ЗУ с частотой обращения до 10 *Мгц* и более, в которых время дешифрации не должно превышать 10—30 *нсек*. Достигнуть таких результатов можно с помощью схем на туннельных диодах и комбинированных схемах, основанных на совместной работе туннельных диодов и транзисторов. Тактовую частоту работы подобных схем удалось довести до 25 *Мгц* [15-11].

Для сравнительной оценки рассмотренных дешифраторов их основные параметры сведены в табл. 15-1. Данные приведены для дешифраторов на 32 выхода ($n_A = 5$). Время дешифрации и частота обращения дешифраторов на элементах с туннельными диодами даны ориентировочно. Расчет количества оборудования произведен только по основным элементам схемы без учета входных устройств.

Рассмотрим теперь некоторые вопросы, связанные со спецификой работы дешифраторов оконечной ступени. В дополнение к требованиям, приведенным ранее, к дешифраторам оконечной ступени предъявляется еще одно существенное требование, качественно отличающее их от дешифраторов X и Y, — необходимость коммутации токов значительной величины и мощности, достаточной для переключения запоминающих элементов.

Обычно дешифраторы оконечной ступени выполняются в виде прямоугольной матрицы, в узлах которой располагаются выходные

шины и коммутирующие элементы. При подаче импульса в одну из горизонтальных входных шин (координата X) и в одну из вертикальных (координата Y) возбуждается выходная шина, которая связана с коммутирующим элементом, соединенным с этими шинами.

Таблица 15-1

Тип дешифратора	Время дешифрации, *мксек*	Частота обращения, *Мгц*	Количество оборудования
Магнитный	1÷2	0,1÷0,2	32 сердечника с ППГ
Диодно-трансформаторный	0,5÷1,5	0,2÷0,3	43 диодно-трансформаторных вентиля, 32 транзистора
Диодный	0,5÷1,0	0,2÷0,3	96 диодов
Диодный с форсированием	0,1÷0,3	До 5	192 диода, 32 транзистора
Транзисторный	0,05÷0,1	5÷10	52 транзистора
Транзисторный с туннельными диодами ..	0,01÷0,04	20÷50	32 транзистора, 32 туннельных диода
На туннельных диодах	0,05÷0,02	50÷100	32 туннельных диода

Дешифраторы оконечной ступени строятся на ферритовых сердечниках с ППГ, на диодах и сердечниках с ППГ, на диодно-трансформаторных вентилях, на диодах и транзисторах.

Принцип работы и некоторые особенности дешифраторов, построенных на тех или иных элементах, описаны в литературе [1-11, 1-16]. Достаточно полный расчет дешифратора на ферритовых сердечниках с ППГ (рис. 6-17) содержится в работах [1-18, 5-3]. Эти дешифраторы нашли широкое применение в ранних разработках ЗУ ввиду их высокой конструктивной надежности и низкой стоимости. Однако они обладают рядом недостатков: наличие помех от полувыбранных сердечников, низкий к. п. д., небольшое быстродействие.

Низкий к. п. д. объясняется значительным расходом энергии на намагничивание полувыбранных сердечников и потери при перемагничивании выбранного сердечника. Общий к. п. д., определяемый как отношение энергии, затрачиваемой на перемагничивание запоминающих сердечников в течение времени записи и считыва-

ния, к энергии, забираемой от источника за время импульса, при оптимальном выборе параметров элементов составляет 0,05—0,1.

Быстродействие дешифраторов на сердечниках с ППГ, как указывалось, ограничивается саморазогревом сердечников.

Улучшить работу дешифратора можно путем установки в каждом узле матрицы диодов (рис. 15-5). В этом дешифраторе весьма малы помехи от полувыбранных сердечников и соответственно меньше нагрузка на формирователи и выше к. п. д. При построении такого дешифратора на ферритовых пластинах, может быть несколько увеличена частота обращения, так как за счет большой поверхности пластин улучшаются условия для теплоотвода.

Соображения увеличения быстродействия ЗУ привели к применению вместо сердечников с ППГ линейных трансформаторов

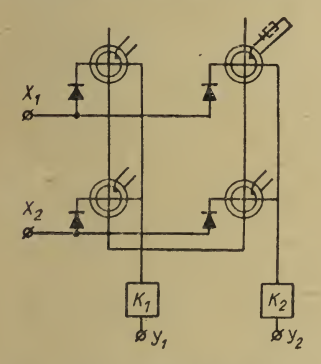


Рис. 15-5. Магнитно-диодный дешифратор.

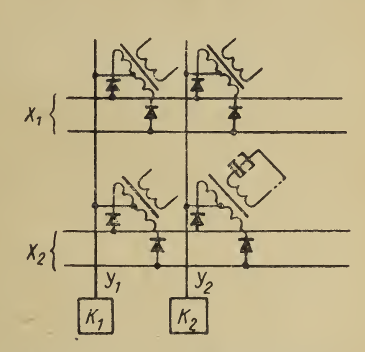


Рис. 15-6. Диодно-трансформаторный дешифратор.

(рис. 15-6). При этом можно применить сравнительно маломощные и быстродействующие диоды и уменьшить влияние емкостной связи между словарными и разрядными шинами на работу формирователей. Это дает возможность увеличить частоту обращения. Так, в работе [15-21] описано ЗУ на ферритовых сердечниках с диодно-трансформаторным оконечным дешифратором. Емкость этого ЗУ составляет 1024 100-разрядных чисел, а полный цикл 450 *нсек*.

Совершенно исключены магнитные элементы в дешифраторах на диодах (рис. 15-7). Здесь, как и в диодно-трансформаторной матрице, практически полностью отсутствуют помехи в невыбранных шинах и, кроме того, значительно уменьшена паразитная индуктивность. Это наряду с малым временем включения (единицы наносекунд) и небольшим прямым сопротивлением диодов позволяет получить высокое быстродействие и минимальные искажения импульсов тока возбуждения. Одной из проблем, возникающих при построении диодных матриц большой емкости, является наличие для координатных токов шунтирующих цепей, состоящих из обратных сопротивлений и емкостей диодов.

Устранить шунтирующее влияние диодов можно разными методами. В частности, в ЗУ фирмы «IBM» [15-14] эта проблема решается путем разделения каждой координатной шины на части с самостоятельным управлением.

Стремление уменьшить количество мощных формирователей достигается применением комбинированного дешифратора око-

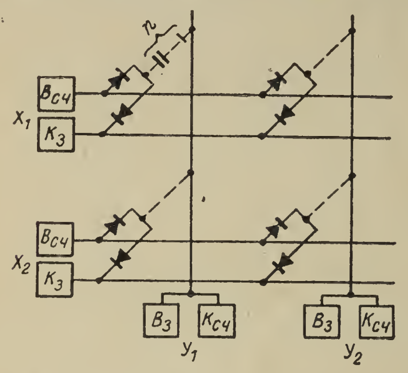


Рис. 15-7. Диодный дешифратор.

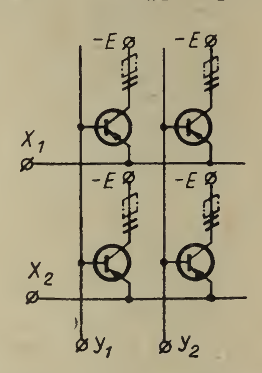


Рис. 15-8. Транзисторный оконечный дешифратор

нечной ступени: последней ступенью является диодная матрица, а предпоследней — матричный переключатель с разделенной нагрузкой [15-14], либо диодно-трансформаторная матрица [15-24].

В ЗУ на тонких магнитных пленках значительную опасность представляют даже небольшие токи помех в невыбранных числовых шинах. Поэтому для уменьшения помех и повышения быстродействия в качестве последней ступени дешифратора предложено [15-29] использовать транзисторную матрицу (рис. 15-8). Здесь переходы эмиттер — база транзисторов служат для селекции, а переходы коллектор — база — для развязки. Дополнительным достоинством такого дешифратора является то, что каждая шина может быть нагружена на свое характеристическое сопротивление.

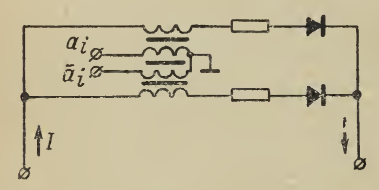


Рис. 15-9. Схема, реализующая распределение тока.

Первые образцы тонкопленочных ЗУ с транзисторными дешифраторами оконечной ступени [8-31, 8-36] подтвердили высокие коммутирующие качества и быстродействие этих дешифраторов. Недостатком их является большая стоимость и габариты при изготовлении на дискретных элементах.

Ряд работ посвящен описанию дешифраторов, построенных по принципу распределения тока [15-2, 15-12], основой которых является схема, изображенная на рис. 15-9. При подаче импульсов

на вход схемы, если падение напряжения на нагрузке, прямом сопротивлении диода и внутреннем сопротивлении вторичной обмотки трансформатора от тока I меньше, чем напряжение, трансформируемое во вторичную обмотку, один из диодов закрывается и весь ток проходит через нагрузку, находящуюся в цепи открытого диода. Анализ работы такой схемы приведен в [15-5, 15-7].

Метод инженерного расчета дешифратора, основанного на принципе распределения тока, описан в [15-10], а примеры его использования в ЗУ описаны в [15-1, 15-3].

Основным достоинством дешифратора на принципе распределения тока является высокая стабильность и идентичность импульсов, подаваемых во все координатные шины ЗУ, за счет гальванической связи всех шин с одним формирователем тока.

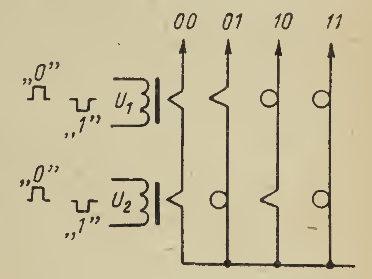


Рис. 15-10. Схема линейного трансформаторного дешифратора на четыре входа.

При разработке ЗУ на магнитных сердечниках с транзисторным управлением возникла задача получения и коммутирования больших токов, необходимых для перемагничивания сердечников ЗУ, при наличии относительно маломощных источников. Эта задача получила успешное решение почти одновременно в Японии и США за счет применения так называемых линейных трансформаторных дешифраторов [15-23, 15-28, 15-30].

Принцип действия этого устройства, представляющего собой линейную электрическую схему, поясняется на рис. 15-10, на котором изображен трансформаторный дешифратор на четыре входа. Каждому двоичному разряду соответствует свой трансформатор. На первичные обмотки подаются прямоугольные импульсы, причем «0» или «1» изображаются импульсами различной полярности. Длительности и амплитуды всех импульсов одинаковы. Четыре вторичных обмотки (по числу выходов дешифратора) прошиты в том или ином направлении в соответствии с кодами 00, 01, 10, 11. Если на первичные обмотки поступает код 00, то на выходе 00 будет напряжение $(U_1 + U_2)$, а на остальных $(U_1 - U_2)$, $(U_2 - U_1)$, $(-U_1 - U_2)$. Если $U_1 = U_2$, то на выбранной шине будет напряжение, равное $2U_1$, а на остальных 0, 0, $-2U_1$.

Дешифраторы типа, показанного на рис. 15-10, называются *дешифраторами со сложением напряжений.* Если поменять местами входы и выходы, то получим другой тип трансформаторных дешифраторов — *со сложением токов.* При работе с трансформаторными дешифраторами от формирователей требуется небольшая мощность, так как мощности всех формирователей складываются через трансформаторы на нагрузке дешифратора, что позволяет при построении формирователей применять маломощные элементы. Поэтому линейные трансформаторные дешифраторы очень часто

называют *матричными переключателями с разделенной нагрузкой.* Нагрузка всех формирователей одинакова и постоянна во времени, что значительно облегчает согласование источников с нагрузкой.

Существует также возможность построения так называемых *идеальных трансформаторных дешифраторов*, или трансформаторных дешифраторов без помех, у которых на любой невыбранной шине напряжение всегда равно нулю [15-23, 15-28].

15-3. Усилители считывания

Условия работы и требуемые характеристики усилителя считывания определяются типом ЗУ, особенностями его организации и применяемыми запоминающими элементами.

Основной особенностью усилителей считывания является то, что на их входе, кроме полезного сигнала, действуют еще сигналы помех, совпадающие и не совпадающие по времени с полезным сигналом.

Усилитель считывания должен обеспечивать:

1) усиление полезного сигнала до заданной величины;
2) различение полезного сигнала на фоне помех;
3) формирование выходного сигнала требуемой формы и длительности;
4) малое время задержки $\tau_з$ сигнала в усилителе;
5) малое время восстановления.

Рассмотрим более подробно каждое из перечисленных требований, их взаимосвязь, а также возможные пути удовлетворения этих требований при расчете и технической реализации схем усилителей.

Для надежного запуска элементов арифметического устройства ЦВМ амплитуда импульсов, поступающих из ЗУ, должна быть порядка нескольких вольт ($2 \div 4$ *в*). Э. д. с. и длительность считанного сигнала зависят от геометрических размеров, материала и типа запоминающих элементов, а также от напряженности и времени нарастания перемагничивающего поля.

Для широко применяемых в настоящее время ферритовых сердечников э. д. с. считанного сигнала составляет десятки и сотни милливольт, а длительность — единицы микросекунд. При использовании форсированного режима считывания длительность сигнала на выходе обмотки считывания может составлять десятые доли микросекунды.

Легко видеть, что для считывания информации с ферритовых сердечников требуется усиление порядка десятков — сотен раз. Требующаяся полоса пропускания усилителя может быть ориентировочно найдена как ширина спектра усиливаемого импульса из следующего соотношения [15-18]:

$$\Delta f_n = \frac{a}{\tau}, \qquad (15\text{-}1)$$

где τ — длительность импульса; a — коэффициент, зависящий от формы усиливаемого импульса, а также от принятого определения ширины спектра и длительности импульса. Для колоколообразного импульса э. д. с. считывания, например, $a = 0{,}94$ [15-25]. Выбор полосы пропускания усилителя по соотношению (15-1) обеспечивает минимальные искажения формы сигнала.

Значение коэффициента усиления всего усилителя K_n, ширина полосы пропускания Δf_n, коэффициент усиления одного каскада K и время задержки $\tau_з$ связаны тесным образом. При прочих равных условиях количество каскадов усилителя выгодно сводить до допустимого минимума, поскольку при этом уменьшается стоимость, габариты, вес и потребляемая мощность усилителя.

Характер помех, действующих на выходе обмотки считывания, самым существенным образом влияет на структурную схему и схемные решения отдельных каскадов усилителя считывания.

Для селекции полезного сигнала на фоне помехи используют амплитудную дискриминацию. Для повышения отношения сигнала к помехе используют стробирование, интегрирование [1-11], а также интегрирование в сочетании с порогом дискриминации, изменяющимся по закону максимальной помехи [15-31].

Типичный усилитель считывания состоит из: 1) предусилителя, 2) каскада стробирования и амплитудной дискриминации и 3) формирователя.

Кроме помехи, возникающей во время считывания, в ЗУ действует еще помеха от тока записи. Амплитуда помехи в такте записи может в сотни раз превышать полезный сигнал, особенно в случае, когда для записи и считывания используется одна и та же шина [15-21, 15-26].

Совместное усиление полезного сигнала и помехи, возникающей в такте записи, при неправильно спроектированном усилителе приводит к тому, что, начиная с некоторого каскада усилителя, сигнал помехи достигает величины, которая приводит к насыщению транзисторов последующих каскадов. В этом случае усилитель не будет реагировать на полезный сигнал, если помеха предшествует полезному сигналу и время восстановления насыщенных каскадов больше времени, отделяющего полезный сигнал от помехи.

Для предотвращения подобного рода перегрузки усилителя используют следующие методы:

1) построение усилителя с дифференциальным входом [15-22, 15-25];
2) использование усилителей с нелинейной амплитудной характеристикой (ограничители и т. д.) [15-22, 15-25];
3) стробирование или бланкирование на входе усилителя [15-31];
4) использование более чувствительных амплитудных дискриминаторов.

Усилители с дифференциальным входом применяются, когда обмотка считывания делается симметричной относительно земляной шины и сигнал помехи от записи не вызывает разностного сигнала на входе усилителя.

К числу усилителей с дифференциальным входом следует отнести усилители с трансформаторным входом и дифференциальные усилители с непосредственными связями.

Весьма перспективно использование ограничителей для расширения динамического диапазона усилителей считывания. В работе [15-22], например, описывается усилитель считывания с временем цикла 50 *нсек*, построенный с использованием ограничителя.

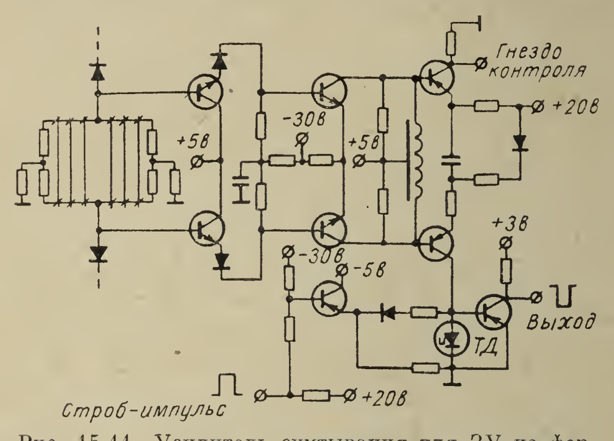


Рис. 15-11. Усилитель считывания для ЗУ на ферритовых сердечниках.

Стробирование и бланкирование на входе усилителей считывания, работающих от малых сигналов, например, в тонкопленочных ЗУ, сопряжено со значительными трудностями, обусловленными помехами, которые могут значительно превышать полезный сигнал.

Многообещающим является применение туннельных диодов в схемах амплитудных дискриминаторов усилителей считывания быстродействующих ЗУ. Использование туннельных диодов позволяет строить чувствительные дискриминаторы, порог срабатывания которых составляет 200 ÷ 300 *мкв*. Применение таких дискриминаторов позволяет снизить коэффициент усиления предусилителя и избежать насыщения выходного каскада предусилителя помехой в такте записи.

На рис. 15-11 приведена принципиальная схема усилителя считывания для ЗУ на ферритовых сердечниках с циклом обращения 450 *нсек*. Усилитель выполнен по дифференциальной схеме, причем для повышения стабильности постоянного уровня на выходе усилителя используется линия задержки. Усилитель работает от полезных сигналов ±50 *мв* при уровне помех от записи до 20 *в*.

На рис. 15-12 представлена схема дифференциального усилителя для тонкопленочного ЗУ, выполненного с непосредственными связями между каскадами. В качестве амплитудного дискриминатора используется туннельный диод.

Рассмотрим типичные структурные схемы усилителей считывания. Структурная схема усилителя считывания определяется

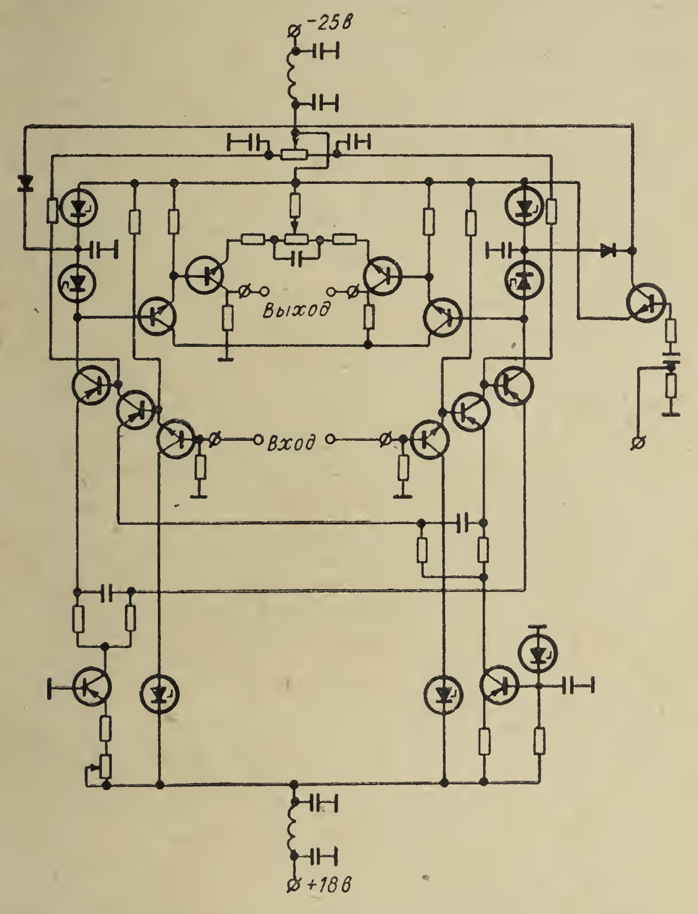


Рис. 15-12. Усилитель считывания для ЗУ на тонких магнитных пленках.

прежде всего амплитудой и длительностью полезного сигнала, способом представления «1» и «0», формой сигнала помехи, а также требуемыми быстродействием, габаритами, потребляемой мощностью, технологичностью и экономичностью.

Так, амплитуда входного сигнала и его длительность определяют количество каскадов усиления, их схемные особенности и полосу пропускания. Наличие большого уровня помех требует

использования специальных каскадов, стробирования и дифференциальных предусилителей, обеспечивающих снижение уровня помех. Для получения на выходе усилителя сигнала постоянной амплитуды и длительности приходится применять специальные усилители-формирователи.

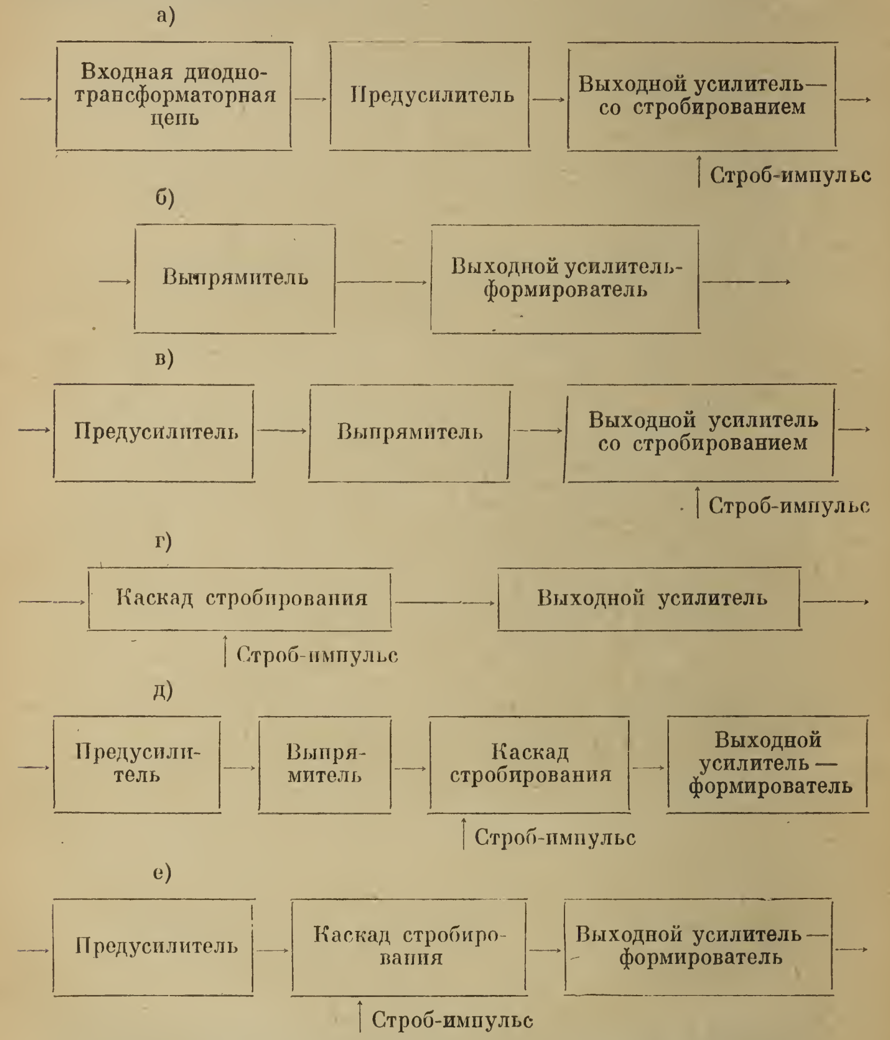


Рис. 15-13. Типичные структурные схемы усилителей считывания.

Кроме того, играет роль, для какого типа ЗУ (двухмерного или трехмерного) рассчитан усилитель считывания и как в ЗУ выполнена обмотка считывания. Играет роль также емкость ЗУ, ибо она определяет уровень помех и количество входов усилителя.

Так, в случае двухмерного ЗУ большой емкости на входе усилителя считывания обязательно должна быть диодно-трансформаторная цепь или диодная сборка, которая обеспечивает связь усилителя с отдельными секциями обмотки считывания. Для временно́й селекции полезного сигнала в схеме усилителя считывания применяют усилительный каскад со стробированием. Общее количество каскадов усиления может быть невелико (2—3 каскада), ибо считывание кода из двухмерных ЗУ может осуществляться в форсированных режимах.

Структурная схема усилителей считывания для указанного типа ЗУ изображена на рис. 15-13, *а*.

Структурные схемы усилителей трехмерных ЗУ (рис. 15-13, *б*, *в*, *г*, *д*) характеризуются некоторыми особенностями.

Например, в состав схем, изображенных на рис. 15-13, *б*, *в* и *д*, входит двухполупериодный выпрямитель. Это обусловлено тем, что в трехмерных ЗУ часто используется диагональная прошивка сердечников обмоткой считывания и выходные импульсы оказываются различной полярности от сердечников, в которых записаны единицы. Усилители считывания для трехмерных ЗУ малой емкости (сто — тысяча чисел) с низким быстродействием обычно просты и собираются по схеме выпрямитель — усилитель (рис. 15-13, *б*) или усилитель — выпрямитель (рис. 15-13, *в*) с последующим стробированием. Предусилитель и входной усилитель у них содержат 1—2 каскада усиления на транзисторах, причем выходной каскад часто выполняет несколько функций: усиления, формирования, стробирования и дискриминации.

Однако такие усилители ненадежно работают при повышении быстродействия и уровня помех. Более надежными и перспективными являются усилители, выполненные по структурной схеме рис. 15-13, *г*, где используется предусилительное стробирование, которое исключает возможность забивания входа помехами.

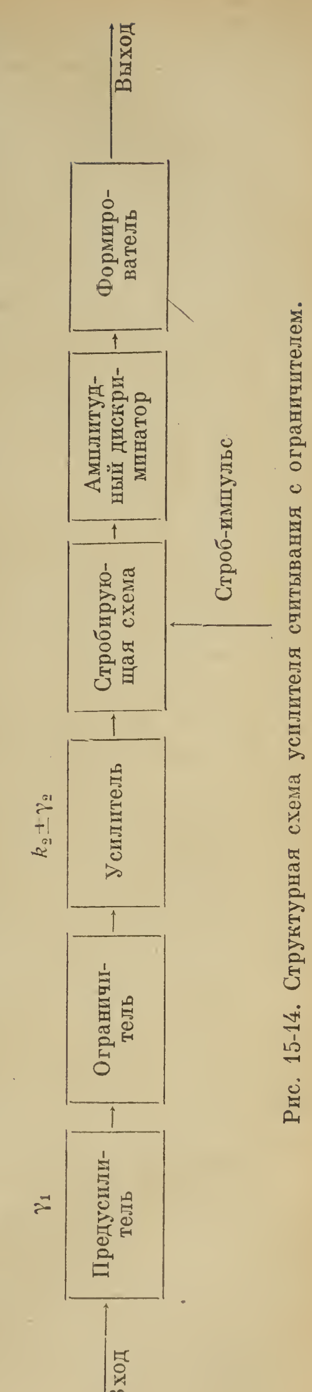


Рис. 15-14. Структурная схема усилителя считывания с ограничителем.

Наиболее сложны по своей структуре схемы усилителей считывания для ЗУ большой емкости и высокого быстродействия. Они обычно имеют балансный предусилитель на одном или нескольких каскадах и двухкаскадный выходной усилитель-формирователь. Обязательной составной частью этих усилителей является каскад усиления со стробированием и дискриминацией. Такая структура обусловлена низким уровнем выходного сигнала, высоким уровнем помех и требованием высокого быстродействия.

Усилители считывания для ЗУ на тонких магнитных пленках по структуре близки к усилителям трехмерных ЗУ на ферритах большой емкости и высокого быстродействия, ибо сохраняется требование еще более высокого быстродействия.

Типичная структурная схема усилителя считывания для ЗУ на тонких пленках показана на рис. 15-13, *е*.

Здесь рассмотрены структурные схемы усилителей считывания, которые получили большое распространение. В принципе возможны структурные схемы усилителей считывания с двойным стробированием с использованием ограничителей (рис. 15-14) и т. д.

Правильный выбор структурной схемы с учетом возможностей существующих элементов обеспечивает в значительной степени успех решения задачи проектирования усилителя считывания.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

НАДЕЖНОСТЬ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

16-1. Общие сведения о надежности запоминающих устройств

Статистика причин сбоев в работе ЦВМ показывает, что ЗУ является одним из наименее надежных блоков машины [16-13], а так как около 60—80% операций при работе машины связано с обращением к оперативному ЗУ [16-2], то анализ его надежностных характеристик и реализация мер, направленных на повышение надежности ЗУ, представляют собой задачи первостепенной важности.

Надежность ЗУ, как и любого другого устройства, может быть определена как совокупность свойств и характеристик, обеспечивающих выполнение заданных функций в течение заданного промежутка времени при определенных условиях эксплуатации.

Оценка надежности включает как учет отказов элементов устройства, так и степень допустимых отклонений параметров его элементов и сигналов в процессе эксплуатации. Существенным фактором надежности устройства является также его помехоустойчивость в отношении внутренних и внешних помех.

Под отказом элемента или устройства понимается полная или частичная утрата работоспособности. Отказы разделяются на постепенные, связанные с уходом параметров элементов за пределы

установленных допусков вследствие износа или старения, и внезапные, не связанные с постепенными изменениями параметров, например, обрыв, пробой и т. д. Постепенные отказы могут прогнозироваться путем систематического наблюдения за параметрами элементов и, таким образом, своевременно предупреждаться; внезапные отказы не допускают прогнозирования. Вообще же все виды отказов представляют собой случайные события, и поэтому безотказность любого устройства характеризуется некоторыми вероятностными характеристиками.

Важной характеристикой надежности устройства является также его ремонтопригодность, под которой понимается приспособленность устройства к предупреждению, обнаружению и устранению отказов. Количественно ремонтоспособность характеризуется затратами времени, труда и средств на перечисленные работы.

Особенностью характеристик надежности дискретных систем вообще и ЗУ в частности является то, что в отличие от обычной радиоэлектронной аппаратуры и аналоговых вычислительных устройств схемы дискретного действия по-иному реагируют на изменения внешних условий или дрейф параметров и имеют другое значение отказов типа «сбой».

С физической точки зрения состояния элементов, соответствующие двоичным символам «0» и «1», не определяются какими-либо точными значениями физических величин (напряжений, токов, зарядов), а допускают некоторую, иногда весьма значительную вариацию этих величин. Таким образом, логическое содержание некоторого аргумента x

$$F(x)=F(x\pm\Delta x),$$

где Δx — допуск, в пределах которого значение функции можно считать неизменным.

Это обстоятельство учитывается при проектировании ЦВМ тем, что в их блоки заранее закладываются определенные запасы надежности по помехоустойчивости и чувствительности как при номинальных внешних условиях, так и в режимах, отличающихся от номинальных (изменения напряжения питания, температуры окружающей среды и т. д.).

Говоря о надежности ЗУ в целом, следует учитывать, что оно состоит из ряда блоков, сильно отличающихся друг от друга и по функциям, и по структуре, и по применяемым в них элементам, чем определяются и резкие различия их надежностных характеристик. Поэтому целесообразно отдельно рассматривать и оценивать надежность схем ЗУ, предназначенных для дешифрации адреса, записи и считывания и хранения информации.

Следуя [5-3 и 16-2], будем различать две компоненты надежности ЗУ — так называемую конструктивную и информационную надежность.

Под конструктивной или элементной надежностью будем понимать вероятность безотказной работы всех элементов блока

или устройства в заданном интервале времени и в заданных условиях эксплуатации. Таким образом, понятие конструктивной надежности совпадает с общепринятым определением надежности радиоэлектронных устройств.

Количественно конструктивную надежность ЗУ P_0 можно выразить произведением:

$$P_0 = q_г q_б, \tag{16-1}$$

где $q_г$ — готовность ЗУ к работе, т. е. вероятность его исправности к моменту начала работы,

$$q_г = \frac{1}{1 + \Lambda t_{рем}}, \tag{16-2}$$

и $q_б$ — вероятность безотказной работы ЗУ в течение заданного промежутка времени, т. е. вероятность невыхода его из строя,

$$q_б = e^{-\Lambda t_{раб}}. \tag{16-3}$$

При этом в выражениях (16-2) и (16-3) использованы следующие обозначения: $\Lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ — интенсивность отказов или средняя частота отказов ЗУ в час (где n — количество элементов ЗУ, а λ_i — средняя частота отказов отдельных элементов в час); $t_{рем}$ — среднее время нахождения и устранения отдельных неисправностей (среднее время ремонта); $t_{раб}$ — время работы ЗУ в часах.

Очевидно, среднее время работы ЗУ между отказами (наработка на отказ)

$$T_{ср} = \frac{1}{\Lambda}. \tag{16-4}$$

Конструктивная надежность ЗУ определяется надежностью его составных частей: накопителя, адресной и разрядной схем. В первую очередь результирующая конструктивная надежность определяется надежностью адресных дешифраторов и усилителей считывания. Анализу надежности дешифраторов посвящена, в частности, работа [16-1], из которой следует, что наибольшей вероятностью безотказной работы по постепенным отказам при построении на непороговых элементах и наибольшим допустимым разбросом параметров при построении на пороговых элементах характеризуются дешифраторы ступенчатого типа. Естественно, что для накопителей различных типов величина конструктивной надежности может весьма значительно отличаться друг от друга. Например, конструктивная надежность накопителей на электроннолучевых трубках относительно невелика. В то же время конструктивная надежность накопителей на различных магнитных элементах намного выше надежности периферийного электронного оборудования ЗУ, так как выход из строя таких запоминающих элементов, как ферритовые сердечники, многоотверстные пластины или магнитные пленки, весьма маловероятен. Поэтому при оценке надеж-

ности наиболее широко распространенных в настоящее время накопителей на магнитных элементах решающую роль приобретает их информационная надежность.

Информационная или функциональная надежность характеризует способность устройства сохранять и выдавать зафиксированную информацию при воздействии максимальных помех и при допустимых неблагоприятных отклонениях параметров исправно функционирующих элементов.

Информационная надежность магнитного ЗУ определяется, в основном, помехоустойчивостью накопителя γ, которая численно может быть выражена в виде

$$\gamma = 1 - \frac{U_{\text{п. макс}}}{U_{\text{с. мин}}}, \tag{16-5}$$

где $U_{\text{п. макс}}$ — максимальное значение помехи на входе усилителя считывания; $U_{\text{с. мин}}$ — минимальное значение сигнала на входе усилителя считывания.

Однако, кроме помехоустойчивости накопителя, информационная надежность в значительной степени зависит еще и от характеристик разрядных цепей воспроизведения информации: усилителей считывания, стробирующих устройств и амплитудных дискриминаторов.

Весьма результативным с практической точки зрения методом оценки надежности ЗУ является введение понятия устойчивости и ее исследование путем построения так называемых областей надежности. Дальнейшее развитие в несколько упрощенном и удобном в применении к магнитным ЗУ виде эти идеи получили, как методы построения областей устойчивой работы, которые будут подробнее рассмотрены в следующем параграфе.

Совокупность величин, характеризующих состояние ЗУ в данный момент: температура, величины управляющих токов и так далее, представляется в n-мерном пространстве некоей изображающей точкой, которая, естественно, должна находиться внутри области надежности, по возможности ближе к ее центру. Расстоянием изображающей точки от границ области определяется запас устойчивости устройства. При приближении изображающей точки к границе области величина этого запаса уменьшается и устройство становится чувствительным к незначительным изменениям внешних условий.

Для облегчения исследований и практического использования областей надежности целесообразно ограничиваться при их построении тремя или даже двумя координатами.

16-2. Устойчивость работы запоминающих устройств

Уже упомянутые выше области надежности в отличие от широко используемых в теории надежности временных характеристик авторы работ [16-12, 16-13] называют пространственными

характеристиками надежности. Такое название оправдывается тем, что эти характеристики не связаны с временем работы устройства, а определяются для любого данного момента времени.

Специфичность порогового режима устройств порогового действия, которыми являются устройства хранения дискретной информации, заключается в том, что в них должно быть обеспечено отсутствие реакции на помехи, не превосходящие некоторого заданного уровня, и надежное срабатывание от сигналов, амплитуда которых превышает определенный минимальный уровень.

Устойчивость и работоспособность таких устройств удобно и надежно интерпретируется геометрически в виде некоторых областей, построенных в n-мерном пространстве внешних условий и внутренних параметров, аналогичных областям устойчивости в теории авторегулирования.

Границей чувствительности в пространстве внешних условий является некоторая поверхность, отделяющая область значений внешних условий, при которых устройство не работает или неустойчиво работает от минимально допустимых сигналов (надежная область) от области, где устройство устойчиво работает от минимального допустимого сигнала (рабочая область).

Границей помехоустойчивости в пространстве внешних условий является некоторая поверхность, определяющая область значений внешних условий, при которых устройство реагирует на предельно допустимую помеху от другой области, где такая помеха не влияет на устройство (рабочая область). При этом, естественно, выбор основных координат должен определяться наибольшей критичностью схемы или устройства к соответствующим параметрам. Вопрос о факторах, определяющих устойчивость магнитных оперативных ЗУ, и о выборе соответствующих критериев при построении областей устойчивости рассматривается, в частности, в работе [16-27].

Если исследовать наиболее распространенное двухмерное ЗУ с магнитным дешифратором, то система управляющих токов для него включает (см. § 6-3): ток считывания в числовой шине $I_{Z\text{сч}}$, ток записи в числовой шине $I_{Z\text{з}}$, ток записи в разрядной шине $I_\text{з}$ и ток смещения $I_\text{см}$. Графическое построение четырехмерной поверхности невозможно, а трехмерной — неудобно для практических целей. Поэтому обычно ограничиваются построением плоских замкнутых областей в плоскости двух параметров в предположении постоянства других аргументов.

В качестве примера рассмотрим область устойчивой работы некоторого двухмерного ферритового ЗУ [16-27], построенную в системе координат $I_\text{з}$ — $I_{Z\text{сч}}$ (рис. 16-1) при некоторых постоянных значениях $I_{Z\text{з}}$ и $I_\text{см}$ (кривая *1*). При изменении этих постоянных значений область устойчивой работы соответственно смещается в ту или иную сторону (кривые *2* и *3*). Определяя ту часть плоскости, в которой ЗУ продолжает устойчиво работать и при допустимых изменениях этих дополнительных параметров (на рис. 16-1

заштрихована), можно построением на плоскости получить практически те же результаты, что и в трехмерном или четырехмерном пространстве.

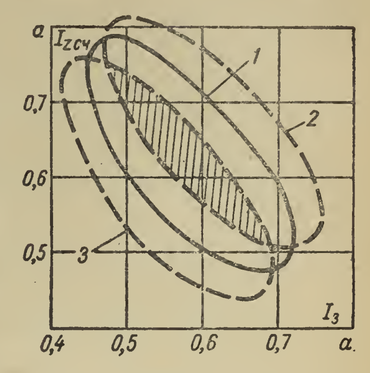


Рис. 16-1. Области устойчивой работы ЗУ на ферритовых сердечниках.

1 — при $I_{z3} = 0{,}6$ *а* и $I_{см} = 0{,}3$ *а*; *2* — при $I_{z3} = 0{,}55$ *а* и $I_{см} = 0{,}3$ *а* или $I_{z3} = 0{,}6$ *а* и $I_{см} = 0{,}33$ *а*; *3* — при $I_{z3} = 0{,}65$ *а* и $I_{см} = 0{,}27$ *а* или $I_{z3} = 0{,}6$ *а* и $I_{см} = 0{,}27$ *а*.

Процесс построения областей устойчивой работы может быть автоматизирован. В частности, этому вопросу посвящена работа [16-7], в которой описано устройство, обеспечивающее быстрый периодический опрос всех ячеек ЗУ при одновременном медленном изменении амплитуды управляющих токов. При этом сигнальный тестер, работающий в режиме записи-считывания, определяет момент сбоев и вырабатывает специальные сигналы сбоев, которые автоматически фиксируются специальной регистрирующей аппаратурой. В работе приведены схемы устройства и построенные им кривые областей устойчивости работы.

На рис. 16-2 приведено графическое изображение области устойчивой работы запоминающего элемента многоотверстной ферритовой пластины с равномерным шагом отверстий [7-12], построенной в системе координат $I_{Z з} - I_{Z сч}$ при постоянной величине разрядного тока записи $I_з$. При этом часть области, в которой наблюдаются взаимные влияния между соседними запоминающими элементами, на рисунке заштрихована.

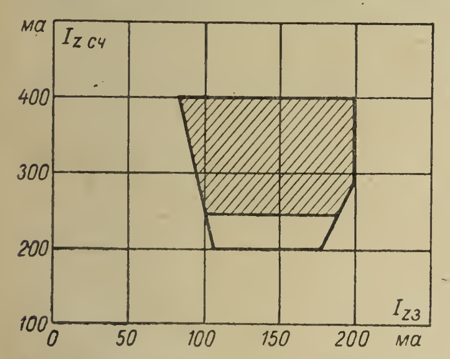


Рис. 16-2. Область устойчивой работы запоминающего элемента на многоотверстной ферритовой пластине.

В работе [7-13] введено еще одно понятие — область работоспособности накопителя, каждая точка которой соответствует наличию в сигнале считывания информации о хранящемся в запоминающем элементе двоичном символе. Однако наличие этой информации в сигнале, т. е. потенциальная возможность ее выделения, не всегда может быть реализована из-за недостаточной чувствительности усилителя считывания или несовершенства схемы выделения сигнала (стробирования и амплитудной дискриминации).

Таким образом, схема выделения информации в оптимальном случае может позволить использование всей области работоспособ-

ности накопителя. Практически, однако, вследствие несовершенства схемы выделения информации ЗУ удается эксплуатировать только в части области работоспособности, которую и можно определить как область устойчивой работы ЗУ.

Графическая интерпретация этой ситуации представлена на рис. 16-3 для накопителя, совмещенного с магнитным дешифратором в системе координат $I_{Z\,сч} - I_{см}$.

Естественно, что размеры областей работоспособности и устойчивой работы и их положение в системе координат для магнитных ЗУ сильно зависят от рабочей температуры.

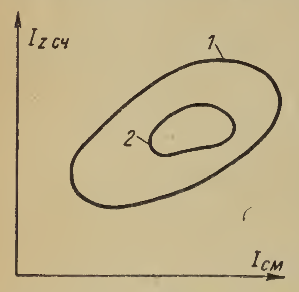


Рис. 16-3. Область работоспособности накопителя (кривая *1*) и область устойчивой работы ЗУ (кривая *2*).

Наибольшую опасность для работоспособности ЗУ на ферритовых элементах представляет несоответствие между величиной коэрцитивной силы $H_с$ и амплитудами импульсов управляющих токов, которое может возникнуть при изменении температуры. Для устранения этой опасности может быть предпринята одна из следующих мер: применение термостабильных сердечников; стабилизация температуры внутри накопителя (термостатирование); автоматическая регулировка токов возбуждения в зависимости от температуры (термокомпенсация) [16-34].

Даже в случае перемагничивания термостабильных сердечников имеет место значительное смещение и деформация областей устойчивой работы. Поэтому из соображений сохранения максимальной надежности работы ЗУ желательно, чтобы рабочая точка всегда находилась вблизи центра области устойчивой работы, что может оправдать применение термокомпенсации и при использовании термостабильных сердечников.

16-3. Избыточность и резервирование как средства повышения надежности

Наряду с мерами повышения конструктивной и информационной надежности за счет улучшения параметров и характеристик запоминающих элементов, накопителей и электронных схем управления, одним из мощных средств повышения надежности является использование избыточности при кодировании информации и при конструировании ЗУ.

Вопросы применения избыточных помехоустойчивых и корректирующих кодов широко освещены в специальной литературе [16-16, 16-26, 16-30 и др.]. Избыточностью называют количественную характеристику возможности представления любого сообщения в более короткой форме. Так, в применении к кодированию в виде дискретных сигналов избыточность можно определить как

отношение количества элементов кода, которые могут быть устранены из него, к исходному количеству элементов.

Несмотря на неэкономичность избыточности, она дает в ряде случаев существенные преимущества, повышая надежность и достоверность при передаче, обработке и хранении информации.

Корректирующие коды — это избыточные коды, позволяющие производить обнаружение и (или) исправление ошибок. При использовании в ЗУ двоичной системы счисления ошибки при записи, хранении или воспроизведении информации, очевидно, сводятся к тому, что на том или ином этапе сигнал «0» может быть воспринят и воспроизведен как «1» или наоборот.

Если некоторое число содержит n двоичных разрядов, причем из них k разрядов являются информационными, то при отсутствии помех или каких-либо других причин искажений этих k разрядов вполне достаточно для воспроизведения данного числа. Избыточные $(n - k)$ разряды используются для обеспечения помехоустойчивости кода, избыточностью которого называют отношение:

$$r = \frac{n - k}{k}. \tag{16-6}$$

Очевидно, что $0 \leq r < 1$.

Одним из простейших примеров корректирующего кода может служить код с одним избыточным разрядом, обеспечивающим возможность так называемой проверки на четность, при котором к информационным разрядам добавляется один контрольный $(k + 1)$-й разряд, значение которого дополняет до четной сумму единиц разрядов кодовой комбинации. Введение дополнительного разряда добавляет к общему количеству «разрешенных» комбинаций 2^k еще такое же количество «запрещенных» комбинаций. Таким образом, общее количество возможных комбинаций N становится равным $N = 2 \cdot 2^k = 2^{k+1}$. В результате такого преобразования кода любые две разрешенные комбинации будут отличаться друг от друга не менее чем двумя знаками, что дает возможность обнаружения одиночной ошибки.

Чем бóльшие требования предъявляются к обнаруживающей и корректирующей способности кода, тем бóльшей должна быть его избыточность. Так, для обнаружения двойной ошибки и исправления одиночной ошибки требуется код, имеющий не менее двух избыточных разрядов, для обнаружения тройной и исправления двойной ошибки — не менее трех избыточных разрядов и т. д.

Предложено большое количество различных корректирующих кодов (код «2 из 5», код Хемминга и др.), которые могут быть использованы для повышения надежности цифровых систем вообще [16-18] и различных ЗУ, в частности [16-10, 16-25].

Естественно, что введение избыточности в коды, связанное с увеличением их длины, приводит к увеличению количества оборудования в системе хотя бы потому, что запоминающие ячейки должны при этом содержать больше запоминающих элементов.

Кроме того, аппаратным способом, с применением специального оборудования часто решаются такие задачи, как образование контрольного кода, контрольной суммы, обнаружение ошибок и т. д. Правда, эти задачи могут иногда решаться и программным способом в основных решающих блоках системы, но тогда это приводит к замедлению процесса вычислений, т. е. надежность повышается не за счет увеличения количества оборудования, а за счет снижения быстродействия, менее эффективного использования оборудования.

Одним из методов избыточности является и резервирование с применением автоматических или полуавтоматических способов переключения функций блоков, вышедших из строя, на резервные. Весьма перспективной в ЗУ вычислительных машин является и реализация идей о введении избыточности во все схемы таким образом, чтобы правильная информация определялась при помощи мажоритарных схем методами «голосования» [16-29]. Для практической реализации таких методов широкий путь откроется, очевидно, в результате интенсивного внедрения интегральной технологии изготовления микроминиатюрных схем, когда удвоение или утроение количества одновременно работающих элементов не будет серьезно сказываться на габаритах и стоимости устройств в целом.

Заключение

Рассмотренными в данной книге элементами и устройствами далеко не исчерпывается длинный список эксплуатируемых и разрабатываемых средств хранения дискретной информации. Количество всевозможных публикаций и патентов в области дискретных ЗУ за последнее десятилетие исчисляется уже десятками тысяч наименований.

Поэтому в книгу не удалось включить описания ряда интересных физико-химических явлений, которые могут быть использованы для создания новых ЗУ и описать всевозможные разнообразные, иногда весьма экзотические ЗУ.

Достаточно упомянуть ЗУ, основанные на явлениях параметрического и ядерного магнитного резонанса, радиационного намагничивания, различных химических явлениях, использовании полимеров, термопластической записи, явлений в лазерах, свойства некоторых материалов (скотофоров) изменять характеристики поглощения под воздействием излучений определенного вида, плазменные эффекты в твердом теле и многие другие.

Однако, несмотря на обилие возможных решений вопроса о хранении дискретной информации, кибернетическая техника все еще не располагает элементами и устройствами, которые бы достаточно хорошо удовлетворяли противоречивые требования большой емкости и высокого быстродействия при ограниченном физическом

объеме, высокой надежности, технологичности и приемлемой стоимости изготовления.

В частности, различные ферромагнитные ЗУ на ферритовых элементах и тонких магнитных пленках, которые, как казалось, являются почти идеальными устройствами хранения, сейчас уже оказываются и недостаточно быстродействующими, особенно в такте записи, которая во всех случаях зиждится на принципе совпадения токов, и плохо согласуются с современными интегральными схемами, так как требуют больших токов записи (порядка сотен миллиампер) и сложных устройств воспроизведения информации.

В перспективе ближайших пяти — десяти лет большие надежды возлагаются на развитие криогенного направления в создании ЗУ сверхбольшой емкости и высокого быстродействия, а также полупроводникового направления (в основном на МОП транзисторах) в создании сверхбыстродействующих ЗУ большой емкости. Однако реализация этих надежд зависит в первую очередь от разработки технологических процессов, обеспечивающих массовое изготовление интегральными методами достаточно однородных и дешевых блоков ЗУ.

Наряду с поисками новых материальных носителей информации, конструкций запоминающих элементов и схем ЗУ, большие резервы совершенствования средств хранения информации скрыты в возможностях совмещения в ЗУ функций хранения и обработки информации, а также в улучшении структуры и организации памяти в вычислительной машине в целом (построение иерархических ЗУ, использование в системе ассоциативных ЗУ и т. д.).

Интенсивнейшая работа по созданию новых типов ЗУ позволяет высказать уверенность в том, что уже в относительно недалеком будущем появятся устройства хранения информации, которые смогут конкурировать по своим параметрам с запоминающими возможностями человеческого мозга. Имеющиеся в настоящее время запоминающие устройства намного превосходят память человека по своему быстродействию. Однако по емкости и гибкости, экономичности и габаритам все технические ЗУ пока еще сильно уступают органам высшей нервной деятельности живых организмов, сформировавшихся в результате сотен миллионов лет эволюционного развития.

Этим определяется целесообразность попыток синтеза новых ЗУ на бионических принципах, т. е. на основании изучения памяти человека и высших животных и перенесения соответствующих процессов и закономерностей в технику хранения информации. Однако практическое осуществление этой задачи требует предварительных длительных и серьезных исследований механизмов хранения информации в живых организмах. Поэтому основных успехов в области развития ЗУ в ближайшие годы следует ожидать на традиционных путях физико-химических исследований и инженерно-логического синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

К главе первой

1-1. Анисимов Б. В., Четвериков В. Н. Основы теории и проектирования цифровых вычислительных машин. Изд. 2, «Машиностроение», 1965.

1-2. Бардиж В. В. Магнитные элементы цифровых вычислительных машин. «Энергия», 1967.

1-3. Быстродействующая вычислительная машина М-2. Под ред. И. С. Брука, Гостехиздат, 1957.

1-4. Гитис Э. И. Электрорадиоавтоматика. Госэнергоиздат, 1959.

1-5. Голышев Л. К. Вычислительные машины. Изд. 2, «Техніка», Киев, 1965.

1-6. Гутенмахер Л. И. Электронные информационно-логические машины. Изд-во АН СССР, 1962.

1-7. Запоминающие устройства. Сб. статей под ред. Л. П. Крайзмера. «Энергия», 1968.

1-8. Китов А. И., Криницкий Н. А. Электронные цифровые машины и программирование. Физматгиз, 1961.

1-9. Китович В. В. Оперативные запоминающие устройства на ферритовых сердечниках и тонких магнитных пленках. «Энергия», 1965.

1-10. Крайзмер Л. П. Новые элементы электронных цифровых машин. «Энергия», 1961.

1-11. Крайзмер Л. П. Быстродействующие ферромагнитные запоминающие устройства. «Энергия», 1964.

1-12. Крайзмер Л. П. Запоминающие устройства. Изд. 2, «Энергия», 1965.

1-13. Крайзмер Л. П. Хранение информации в кибернетических системах. В сб. «Информация и кибернетика», под ред. А. И. Берга, «Советское радио», 1967.

1-14. Крайзмер Л. П., Лашевский Р. А. Прогресс в технике оперативных запоминающих устройств. «Зарубежная радиоэлектроника», 1967, № 6.

1-15. Крайзмер Л. П. Устройства хранения информации (Обзор развития и перспективы). Изв. вузов, «Приборостроение», 1967, т. 10, № 10.

1-16. Магнитные элементы цифровой техники. Под ред. А. Мейергофа, пер. с англ. под ред. М. А. Розенблата и Л. П. Крайзмера, «Энергия», 1964.

1-17. Майоров С. А. Технология производства вычислительных машин. «Машиностроение», 1965.

1-18. Меркулов Н. И., Павликов А. А., Федоров А. С. Запоминающие устройства БЭСМ-2. Физматгиз, 1962.

1-19. Миловзоров В. П. Электромагнитная техника. «Энергия», 1964.

1-20. Оперативные и постоянные запоминающие устройства. Сб. статей под ред. Л. П. Крайзмера, «Энергия», 1965.

1-21. Прокудин В. А. Запоминающие устройства электронных цифровых вычислительных машин. «Советское радио», 1961.
1-22. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. «Наука», 1966.
1-23. Субье-Ками А. Двоичная техника и обработка информации. «Мир», 1964.
1-24. Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах. Физматгиз, 1959.
1-25. Хавкин Г. А. Запоминающие устройства цифровых вычислительных машин. Госатомиздат, 1961.
1-26. Цитович А. П. Ядерная радиоэлектроника. «Наука», 1967.
1-27. Шорыгин А. П. Магнитные элементы вычислительных машин. «Высшая школа», 1965.
1-28. Becker J., Hayes R. M. Information storage and retrieval: tools, elements, theories. Wiley, New York. 1964.
1-29. Communications présentées au Colloque international sur les techniques des memoires (Paris, 5—10 avril 1965), Editions Chiron, Paris, 1966.
1-30. Heimbach E. Digitale Schnellspeicher und ihre Weiterentwicklung. Proc. of the IFAC/IFIP Symposium 12—23 October, 1965, Oldenburg Verlag, München — Wien, 1966.
1-31. Large-capacity memory techniques for computer systems. Ed. by M. C. Yovits, Macmillan, New York, London, 1962.
1-32. Louis H. P., Shevel W. L. Storage systems — present status and anticipated development. Trans. IEEE, 1965, v. MAG-1, № 3.
1-33. Rajchman J. A. Computer memories — possible future developments. RCA Review, 1962, v. 23, № 2.
1-34. Rajchman J. A. Memories in present and future generations of computers, IEEE Spectrum, 1965, v. 2, № 11.
1-35. Renwick W. Digital storage systems. Spon. Ltd., London, 1964.

К главе второй

2-1. Амдаль Дж. и др. Архитектура системы IBM-360. «Кибернетический сборник», новая серия, № 1, «Мир», 1965.
2-2. Базилевский Ю. Я. О структуре запоминающих устройств. В сб. «Вопросы теории математических машин», вып. 1, Физматгиз, 1958.
2-3 Гладун В. П., Якуба А. А. Упорядоченное извлечение многозначного ответа из ассоциативной памяти. «Кибернетика», 1965, № 5.
2-4. Китов А. И. Программирование информационно-логических задач. «Советское радио», 1967.
2-5. Крайзмер Л. П. и др. Ассоциативные запоминающие устройства. «Энергия», 1967.
2-6. Ледли Р. Программирование и использование машин. «Мир», 1966.
2-7. Мамонтов Е. И. Зависимость основных параметров и структуры систем хранения информации от характеристик цифровых вычислительных машин. В сб. «Вычислительная техника», № 5, «Машиностроение», 1966.
2-8. Паперпов А. А. Логические основы цифровых машин и программирование. «Наука», 1965.
2-9. Паперпов А. А., Стасевич Г. В. Об одном методе упорядочения информации в ЗУ цифровых машин. «Проблемы передачи информации», 1965, т. 1, вып. 3.
2-10. Сибер Р. Р. и др. Структура криогенного ассоциативного устройства обработки данных. Труды ИИЭР (р. пер.), 1964, т. 52, № 10.
2-11. Фистер М. Логическое проектирование цифровых вычислительных машин, «Технiка», Киев 1964.
2-12. Ahrons R. W. Superconductive associative memories. RCA Rev., 1963, v. 24, № 3.
2-13. Frei E. H., Goldberg Y. A. A method for resolving multiple responses in a parallel search file. Trans. IRE, 1961, v. EC-10, № 4.

2-14. Hanlon A. G. Content — addressable associative memory systems — a survey. Trans. IEEE, 1966, v. EC — 15, № 4.
2-15. Kaplan A. A search memory subsystem for a general purpose computer. AFIPS, 1963, Fall Joint Computer Confer.
2-16. Kilburn T. One level storage system. Trans. IRE, 1962, v. EC — 11, № 4.
2-17. Ledley R. S. Organisation of large memory systems. «Large-capacity memory techniques for computing systems», ed. by M. C. Yovits, The Macmillan Company, N. Y., London, 1962.
2-18. Lewin M. H. Retrieval of ordered lists from a contents addressed memory. RCA Rev., 1962, v. 23, № 2.
2-19. Peterson H. E. Addressing for random access storage. IBM J. Research and Developm., 1957, v. 1, № 2.
2-20. Pohm A. V. et al. Large, high-speed DRO film memory. Proc. Intermag Confer., 1963.
2-21. Scarrott G. G. The efficient use of multilevel storage. Proc. 1965 IFIP Congr., v. II.
2-22. Seeber R. R., Lindquist A. B. Associative memory with ordered retrieval. IBM J. Research and Developm., 1962, v. 6, № 1.
2-23. Shay G. H., Spruth W. G. Analyses of a file addressing method. Comm. ACM, 1962, v. 5, № 8.
2-24. Wilkes M. V. Slave memories and dynamic storage allocation. Trans. IEEE, 1965, v. EC — 14, № 2.

К главе третьей

3-1 Броун О. Автоматизация учета. Судпромгиз, 1960.
3-2. Евдокимов. И. С., Евстигнеев Г. П., Криушин В. Н. Цифровые вычислительные машины. Машгиз, 1961.
3-3. Зак Л. А., Кулешов Н. П., Петров И. А. Система устройств ввода и вывода на перфокартах вычислительной машины БЭСМ-2. Вычислительный центр АН СССР, 1961.
3-4. Зелигер Н. Б. Курс телеграфии. Ч. I, Связьиздат, 1961.
3-5. Итоговый перфоратор (ИП-80). Описание и инструкция по эксплуатации. ЦБТИ Мосгорсовнархоза, 1959.
3-6. Кейси Р. С. Перфорированные карты и их применение в науке и технике. Машгиз, 1963.
3-7. Мирошников И. Ф. Читающее устройство на фотодиодах и кристаллических триодах. Филиал ВИНИТИ АН СССР, 1958.
3-8. Палашевский А. М. Анализ носителей информации вычислительных машин. В сб. «Вычислительная техника», МВТУ, № 2, Машгиз, 1959.
3-9. Роометс С. Перфокарты и их применение. ЦБТИ СНХ ЭССР, 1963.
3-10. Рязанкин В. Н., Коноплев В. В., Добецкий Л. Ю. Советские счетно-аналитические машины. Госстатиздат, 1957.
3-11. Седлачек Я., Штетка К. Перфолента. «Статистика», 1964.
3-12. Трубников Н. В. Ввод и вывод информации в быстродействующих цифровых вычислительных машинах. «Автоматическое управление и вычислительная техника», Труды совещания в марте 1957 г., Машгиз, 1958.
3-13. Angel A. M. A very high-speed punched paper tape reader. IRE Wescon. Convent. Rec., 1957, v. 1, pt. 4.
3-14. Barden W. High-speed punched-card readers, Electron. World, 1967, v. 77, № 1.
3-15. Bianco R. J. A high-speed reader for perforated tape. Trans. IRE, 1956, v. PGL — 5.
3-16. Nicholson A. W. Peripheral transfer system for a fast computer. Proc.IEE, 1964, v. 111, № 1.

3-17. Theis M. E. Digital storage on punched tape. Tranc. Soc. Instrum. Technol., 1958, v. 10, № 4.
3-18. Welcome W. A. A new concept for a paper — tape high information rate reader. IRE Wescon. Convent. Rec., 1957, v. 1, pt. 5.

К главе четвертой

4-1. Альтрихтер Э. Магнитная лента. Изд-во иностр. лит., 1959.
4-2. Васильев О. П., Маловичко В. В., Петров Б. Б. Запоминающие устройства с цифровой магнитной записью для ЦВМ. Приложение к кн. А. Хогленда [4-11].
4-3. Каган Б. М., Адасько В. И., Пурэ Р. Р. Запоминающие устройства большой емкости. Под ред. Б. М. Кагана, «Энергия», 1968.
4-4. Клепинин В. С., Коноплянников Е. Г. Лентопротяжный механизм большой емкости для ЭВМ. «Приборы и системы управления», 1967, № 6.
4-5. Магнитная запись. Сб. переводных статей под ред. В. Г. Королькова, «Мир», 1966.
4-6. Магнитная запись электрических сигналов. По материалам иностранной периодической печати, «Энергия», 1967.
4-7. Ми Ч. Физика магнитной записи. «Энергия», 1967.
4-8. Парфентьев А. И., Пуссет Л. А. Физические основы магнитной записи звука. Гостехиздат, 1957.
4-9. Сыпчук П. П., Гулин Ф. Ф., Палашевский А. М. Магнитная запись в вычислительной технике. ЦНИИКА, 1958.
4-10. Хетагуров Я. А. Запоминающее устройство на магнитном барабане. В сб. «Автоматическое управление и вычислительная техника», Машгиз, вып. 5, 1962.
4-11. Хогленд А. Цифровая магнитная запись. «Советское радио», 1967.
4-12. Хопнер Э. Повышение плотности записи на магнитный носитель в вычислительных машинах. «Энергия», 1965.
4-13. Шадрин В. Н. Магнитная запись в автоматике. Госэнергоиздат, 1962.
4-14. Bycer B. B. Digital magnetic tape recording. Principles and computer applications, New York, Hayden, 1965.
4-15. Comstock G. E. 500 000 000-bit random-access memory. Instrum. and Automation, 1956, v. 29, № 11.
4-16. Nijenhuis W., Weg H. Fortschritte auf dem Gebiet der Elektronenrechner während des letzten Jahrzehnts, «Phillips Techn. Rundschau», 1965, № 7.
4-17. Riedle H. Der Maghetkartenspeicher CRAM. Elektronische Rechenanlagen, 1962, Bd. 4, № 6.
4-18. Willaschek K. Flußempfindlicher Wiedergabekopf in der Maghetspeichertechnik. «Messen — Steuern — Regeln», 1965, Bd. 8, № 3.

К главе пятой

5-1 Антиферромагнетизм и ферриты. «Итоги науки». Сб. 4. Изд.-во АН СССР, 1962.
5-2. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Госэнергоиздат, 1936.
5-3. Балашов Е. П. Проектирование магнитных элементов и устройств электронных вычислительных машин. «Высшая школа», 1966.
5-4. Бардиж В. В. Вопросы импульсного перемагничивания ферритовых сердечников. В сб. «Магнитные элементы», ИТМ и ВТ АН СССР, 1960.
5-5. Бардиж В. В., Кобелев В. В. О намагниченности насыщения ферритовых сердечников с ППГ. ИТМ и ВТ АН СССР, 1966.

5-6. Белявский В. Ф., Поливанов К. М. О динамических характеристиках ферромагнитных сердечников. НДВШ, «Электромеханика и автоматика», 1959, № 2.
5-7. Бозорт Р. Ферромагнетизм. Изд-во иностр. лит., 1956.
5-8. Бондарев Д. Е. Трансформация магнитных свойств скандийсодержащих ферритов. ДАН СССР, 1964, т. 164, № 1.
5-9. Боровик Е. С., Мильнер А. С. Лекции по ферромагнетизму. Изд. Харьковского ун-та, 1960.
5-10. Глотов В. Г., Долкарт В. М. Об импульсном перемагничивании ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса. «Вестник электропромышленности», 1960, т. 31, № 3.
5-11. Елкин В. Г. Динамические характеристики ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса и их применение. Материалы научно-технической конференции НТОР и Э, Минск, 1960.
5-12. Заволокина З. И. Магнитные элементы в цифровых вычислительных машинах. Госэнергоиздат, 1958.
5-13. Ильяшенко Е. И. Исследование неразрушаемого считывания информации с обычных ферритовых тороидов. «Научно-техническая информация». Изд. ВИНИТИ АН СССР, 1963, № 9.
5-14. Ыыуду К. А. Об использовании явления идеальной петли гистерезиса для повышения надежности матричных запоминающих устройств. Научно-технический информационный бюллетень ЛПИ. «Электротехника», 1960, № 8.
5-15. Кифер И. И. Характеристики ферромагнитных сердечников. «Энергия», 1967.
5-16. Миниатюрные ферритовые сердечники для вычислительных машин. «Электроника», 1966, т. 39 № 10.
5-17. Мириджанян М. Г. Запоминающее устройство со считыванием поперечным полем. Авт. свид. № 168534, Бюлл. изобрет., 1965, № 4.
5-18. Нитсон П. Анализ и расчет ферритовых цифровых элементов. «Энергия», 1967.
5-19. Пирогов А. И. Влияние температуры на процесс перемагничивания ферритовых сердечников, см. [5-31].
5-20. Пирогов А. И., Шамаев Ю. М. Магнитные сердечники в автоматике и вычислительной технике. Изд. 2, «Энергия», 1967.
5-21. Поливанов К. М. Ферромагнетики. Госэнергоиздат, 1957.
5-22. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. Физматгиз, 1960.
5-23. Рабкин Л. И., Соскин С. А., Эпштейн Б. Ш. Технология ферритов. Госэнергоиздат, 1962.
5-24. Раскина И. М. Исследование режимов работы ферритовых сердечников с ППГ на частных циклах, см. [1-20].
5-25. Розенблат М. А. Магнетоника. «Наука», 1967.
5-26. Розенблат М. А. Зависимость статических характеристик тороидальных сердечников от их геометрических размеров. «Автоматика и телемеханика», 1958, т. 19, № 8.
5-27. Росницкий О. В. Об исследовании эффекта сползания несимметричных петель гистерезиса. Изв. АН СССР, сер. физич., 1961, № 12.
5-28. Смольков Н. А., Белов В. Ф. Некоторые свойства ферритов в импульсном режиме. Изв. АН СССР, сер. физич., 1959, т. 23, № 3.
5-29. Телеснин Р. В., Курицына Е. Ф. О скорости перемагничивания ферритов. Изв. АН СССР, сер. физич., 1959, т. 23, № 3.
5-30. Торопов В. С. Применение идеальной петли гистерезиса ферромагнетиков в магнитных запоминающих устройствах. ВЦ АН СССР, 1962.
5-31. Ферриты. Доклады III Всесоюзного совещания по физике, физико-химическим свойствам ферритов и физическим основам их применения. Изд-во АН БССР, 1960.
5-32. Apicella A., Franks J. BILOG — a high speed NDRO one core per bit associative element. Proc. 1965 Intermag.

5-33. Brinton J. B. Remember with microwaves. Microwaves, 1967, v. 6, № 1.
5-34. Brown D. A. H. Behaviour of square loop magnetic cores in circuits. Electronic Engineering, 1959, v. 31, № 377.
5-35. Buck D. A., Frank W. I. Nondestructive sensing of magnetic cores. Communications and Electronics, 1954, v. 72, № 10.
5-36. Gilli L., Meo A. R. On partial switching in magnetic cores. Alta frequenza, 1965, v. 34, № 8.
5-37. Gyorgy E. M., Hagedorn F. B. Uniform rotational flux reversal of ferrite toroids. J. Appl. Phys., 1959, Suppl. to v. 30, № 4.
5-38. Heide H. et al. Switching time of ferrites with rectangular hysteresis loop. «Phillips Techn. Rev», 1956—57, v. 18, № 11.
5-39. Hesterman V. W. Switching properties of a partially — set square — loop ferrite core. Proc. 1965 Intermag Confer.
5-40. Hilberg W. Toroide aus Rechteckferrit als Schaltelemente. Archiv elektr. Übertragung, 1961 Bd. 15, № 3.
5-41. Kobayashi S., Torii M. Twelve — mil ferrite cores for computer memory. Trans. IEEE, v. Mag-2, № 3.
5-42. Lindsey C. H. The square — loop ferrite core as a circuit element. Proc. IEE, 1959, v. 106, pt. C, № 10.
5-43. Papoulis A. The nondestructive read — out of magnetic cores. Proc. IRE, 1954, v. 42, № 8.
5-44. Rhodes W. H. et al. A 0,7 — microsecond ferrite core memory. IBM J. Research a. Developm., 1961, v. 5, № 3.
5-45. Roberts R. W., Van Nice R. J. Influence of ID/OD ration on static and dynamic magnetic properties of toroidal cores. Trans. AIEE, 1955, v. 74, pt. 1.
5-46. Sands E. A. The behaviour of rectangular hysteresis loop magnetic materials under current pulse conditions, Proc. IRE, 1952, v. 40, № 10.
5-47. Shevel W. L. Observations of rotational switching in ferrites. IBM J. Res. a. Developm., 1959, v. 3, № 1.
5-48. Shevel W. L., Gutwin O. A. Partial switching, nondestructive readout storage systems, 1960, Internat. Solid — State Circuits Confer., N. Y., 1960.
5-49. Tillman R. M. Fluxlok — a nondestructive random — access electrically alterable high — speed memory technique using standard ferrite memory cores. Trans. IRE, 1960, v. EC-9, № 5.
5-50. Vassiliev A. et al. Les ferrites a base d'ions lithium en tant que matériaux magnétiques a mémoires, см. [1-29].
5-51. Weisz R. S. Square — loop ferrites with temperature — independent properties and improved disturb ratio. J. Appl. Phys., 1961, v. 32, № 6.
5-52. Weisz R. S., Brown D. L. Square — loop properties of copper — manganese ferrites. J. Appl. Phys., 1960, Suppl. to v. 31, № 5.
5-53. Werner G. E., Whalen R. M. A 110-nanosecond ferrite memory. Trans. IEEE, 1966, v. Mag-2, № 3.
5-54. Widrow B. A radio-frequency nondestructive readout for magnetic core memories. Trans. IRE, 1954, v. EC-3, № 4.
5-55. Yamada S. et al. Research on double frequency memory. Rev. El. Commun. Lab., 1962, v. 10, № 1—2.

К главе шестой

6-1. Балашов Е. П., Генкин В. Л., Сорокин М. С. Магнитное оперативное запоминающее устройство повышенной надежности. Изв. вузов, «Приборостроение», 1963, т. 6, № 4, 5.
6-2. Грязнов Н. И., Магнитное оперативное запоминающее устройство для информационно-логической машины. Журнал научно-технической информации, 1965, № 1.

6-3. Гураков А. А., Шевелев А. Г. Запоминающее устройство на ферритах с записью и считыванием полными токами перемагничивания. В сб. научных трудов Киевского ин-та гражданского воздушного флота, 1961, вып. 1.
6-4. Константинов В. П., Ушаков Е. В., Филипнов Е. Н. Конструкция и основные свойства ферритовых матриц. «Цифровая техника и вычислительные устройства». Сб. 3. Изд-во АН СССР, 1962.
6-5. Росницкий О. В. Матричные запоминающие устройства на магнитных сердечниках. Изд. МЭИ, 1960.
6-6. Собельман В. И. О геометрии прошивок ферритовых матриц. «Проблемы кибернетики», вып. 6, Физматгиз, 1961.
6-7. «2,5-мерное» ЗУ, работающее с наносекундным временем обращения. «Электроника», 1966, т. 39, № 7.
6-8. Allen C. A., Bruce G. D., Councill E. D. A 2.18-microsecond megabit core storage unit. Trans. IRE, 1961, v. EC-10, № 2.
6-9. Ashley A. H., Cohler E. U. Solving noise problems in digital computer memoriees. Electronics, 1960, v. 33, № 13.
6-10. Bandat K. Zur Störreduktion in Ferritkern — Matrizenspeichern. «Elektronische Rechenanlagen», 1960, Bd. 2, № 4.
6-11. Böhringer M. Zu Struktur und Organisationsformen von Matrixspeichern. «Nachrichtentechnik», 1966, № 10.
6-12. Cooke P., Dillistone D. C. The measurement and reduction of noise in coincident — current core memories. Proc. IEE, 1962, v. B109, № 47.
6-13. Gilligan T. J. 2¹/² D high speed memory systems — past, present and futur. Trans. IEEE, 1966, v. EC — 15, № 4.
6-14. Moore D. W. A cost/performance analysis of integrated — circuit core memories. AFIPS Conference Proceedings, 1966, v. 29.
6-15. Petschauer R. J., Andersen G. A., Neumann W. J. A large-capacity, low-cost core memory. Proc. IFIP Congress, 1965.
6-16. Schmid H., Müller P. Siemens-Datenverarbeitungssystem 4004—eine neue Familie leistungsfähiger elektronischer Datenverarbeitungsanlagen. «Elektronische Rechenanlagen», 1965, Bd. 7, № 4.
6-17. Tsui E. Die Abhängigkeit der Störabstände in Lesesignalen von dem Gesamt-Informationsinhalt in einem Stromkoinzidenz — Ferritkernspeicher und ihre Verbesserung durch asymmetrische Ansteuerung. «Elektronische Rechenanlagen», 1964, Bd. 6, № 2.
6-18. Veith P. Kernspeichermatrizen. «Elektronik», 1961, Bd. 10, № 11.
6-19. Wells G. The design of a large 1,5 microsecond memory system. Elektronische Rechenanlagen, 1962, Bd. 4, № 8.
6-20. Werner G. E., Whalen R. M. A 375-nanosecond main memory system utilizing 7-mil cores. AFIPS Proc., Fall Joint Computer Confer., 1965.

К главе седьмой

7-1. Ашман А. Е. Магнитное записывающее или логическое устройство. Авт. свид. № 126663, Бюлл. изобрет., 1960, № 5.
7-2. Ашман А. Е. Способ выборочной записи информации. Авт. свид. № 171162, Бюлл. изобрет., 1965, № 10.
7-3- Ашман А. Е. Запоминающие элементы с модуляцией магнитного сопротивления. В сб. «Вопросы теории электрических цепей для преобразования измерительной информации». «Наукова думка», Киев, 1967.
7-4. Бардиж В. В., Перекатов В. И. Флюксор как элемент запоминающих устройств. ИТМ и ВТ АН СССР, 1962.
7-5. Бачин О. В. Возможности применения трансфлюксоров в запоминающих и задающих устройствах. В сб. «Магнитные элементы», ИТМ и ВТ АН СССР, 1960.

7-6. Берг И. В., Старос Ф. Г. Ферритовая пластина для магнитного запоминающего устройства. Авт. свид. № 151507, Бюлл. изобрет., 1962, № 21.
7-7. Визун Ю. И., Ефимов И. А., Тарасов Л. Г. Некоторые вопросы построения оперативной памяти на элементах типа биакс. В сб. «Магнитные элементы вычислительной техники», «Наука», 1966.
7-8. Дроботов Ю. В. и др. Конструкция, технология изготовления и измерения ферритовых плат МОЗУ ЦВМ. «Современная цифровая автоматика и вычислительная техника». Материалы семинара. Сб. 1, МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1962.
7-9. Козлов Г. Д. Влияние неравномерности намагничивания на статические характеристики сердечника. «Автоматика и телемеханика», 1960, № 1 и 7.
7-10. Козлов Г. Д. Характеристики магнитных устройств с разветвленной формой магнитопровода. «Автоматика и телемеханика», 1962, т. 23, № 6.
7-11. Кравченко Л. Д. Трансфлюксоры в устройствах телеуправления. Гостехиздат УССР, 1963.
7-12. Лашевский Р. А., Тамарченко Н. Г. Элементы памяти на многоотверстных ферритовых пластинах. В сб. «Магнитные элементы вычислительной техники», «Наука», 1966.
7-13. Лашевский Р. А., Тамарченко Н. Г., Хавкин В. Е. Запоминающие устройства на многоотверстных ферритовых пластинах. «Энергия», 1969.
7-14. Майоров С. А. Проектирование и производство модулей и микромодулей. «Машиностроение», 1968.
7-15. Мегуайр Т. Новая технология изготовления запоминающих устройств. «Электроника», 1966, т. 39, № 14.
7-16. Оборонко А. Е. О механизме неразрушающего считывания с плоских ферромагнитных элементов с прямоугольной петлей гистерезиса при взаимодействии магнитных потоков. В сб. «Магнитные цифровые элементы», «Наука», 1965.
7-17. Перекатов В. И. Бифлакс — новый магнитный элемент памяти с форсированным режимом записи и быстрым считыванием без разрушения информации. «Автоматика и телемеханика», 1967, № 3.
7-18. Разыков Р. С. Расчет геометрических размеров трансфлюксоров и определение требований к магнитным параметрам материала. В сб. «Магнитные элементы вычислительной техники», «Наука», 1966.
7-19. Торопов В. С. Использование многодырочных сердечников в оперативных запоминающих устройствах. ВЦ АН СССР, 1963.
7-20. Цогоев Т. К. Магнитное запоминающее устройство памяти со считыванием информации без ее разрушения. Авт. свид. № 155997, Бюлл. изобрет., 1963, № 14.
7-21. Abbott H. W., Suran J. J. Multihole ferrite core configurations and applications. Proc. IRE, 1957, v. 45, № 8.
7-22. Abeyta I., Kaufman M. M., Lawrence P. Monolithic ferrite memories. RCA Rev., 1966, v. 27, № 1.
7-23. Baldwin J. A., Rogers J. L. Inhibited flux — a new mode of operation of the three — hole memory core. J. Appl. Phys., 1959, Suppl. to v. 30, № 4.
7-24. Bartkus E. A. et al. An approach towards batch fabricated ferrite memory planes. IBM J. Research a. Developm., 1964, v. 8, № 2.
7-25. Beveridge R. W. The microbiax memory element. Wescon/65 Technical Papers, Los Angeles, 1965.
7-26. Bobeck A. H. The cubic waffle — iron memory. Proc. Intermag Confer., 1963.
7-27. Chen T. C. Magnetic device. Пат. США, кл. 340—174, № 2918663.
7-28. Chen T. C., Lane J. H. Nondestructive read — out of magnetic memory elements. Пат. США, кл. 340—174, № 2918661.

7-29. Fabrication of ferrite memory. Проспект фирмы «British Scientific Instrument Research Associated» (SIRA).
7-30. Morgan W. L. Transfluxor design considerations. Trans. IRE, 1961, v. ED-8, № 2.
7-31. Petersen M. G. An NDRO airborne memory system utilizing the microbiax element. Wescon/65 Technical Papers, Los Angeles, 1965.
7-32. Pohm et al A. V. Analysis of 10^8 element magnetic film memory systems. Proc. Intermag Confer., 1964.
7-33. Rajchman J. A., Lo A. W. The transfluxor — a magnetic gate with stored variable setting. RCA Rev., 1955, v. 16, № 2.
7-34. Rajchman J. A., Lo A. W. The transfluxor. Proc. IRE, 1956, v. 44, № 3.
7-35. Rajchman J. A. Integrated magnetic and superconductive memories — a survey of techniques, results and prospects. Proc. IFIP Congress, May 24—29, 1965, N. Y., v. 1.
7-36. Rajchman J. A. Ferrite apertured plate for random access memory. Proc. IRE, 1957, v. 45, № 3.
7-37. Rowe I. H., Slemon G. R. On the process of flux reversal in multiaperture ferrite cores. Communications a. Electronics, 1961, № 56.
7-38. Shahbender R. et al. Microaperture high-speed memory. RCA Rev., 1962, v. 23, № 4.
7-39. Shahbender R. et al. Laminated ferrite memory. RCA Rev., 1963, v. 24, № 4.
7-40. Smith J. L. Waffle iron — a new memory structure. J. Appl. Phys., 1963, v. 34, № 4, pt. 2.
7-41. The littlest biax. «Electronics», 1964, v. 37, № 21.
7-42. Wanlass C. L., Wanlass C. D. Biax high-speed magnetic computer element. IRE Wescon. Convent. Record, 1959, v. 3, № 4.

К главе восьмой

8-1. Апокин И. А., Кипаренко Г. Ф. Тонкие магнитные пленки в вычислительной технике. «Энергия», 1964.
8-2. Бадлевский Ю. Н. Запоминающие устройства матричного типа на тонких ферромагнитных пленках (обзор). «Зарубежная радиоэлектроника», 1961, № 5.
8-3. Бережной Е. Ф., Кобелев В. В., Ненароков А. Ф., Шашко В. Д. Запоминающее устройство на тонких матрицах с проводящей подложкой. В сб. «Магнитные элементы вычислительной техники», «Наука», 1966.
8-4. Бережной Е. Ф., и др. Запоминающее устройство на магнитопленочных матрицах МПМ-7. ИТМ и ВТ АН СССР, 1967.
8-5. Дитрих В., Пробстер В. Перемагничивание тонких магнитных пленок длительностью порядка миллимикросекунд, см. [8-13].
8-6. Дятлов В. Л. Некоторые вопросы построения магнитных плоских пленочных элементов вычислительной техники с замкнутыми магнитопроводами. В сб. «Вычислительные системы», «Наука», Новосибирск, 1966.
8-7. Ефимов И. А. Исследование времени перемагничивания ферромагнитных пленочных элементов. ИТМ и ВТ АН СССР, 1961.
8-8. Китович В. В., Страхов В. Г. К вопросу о вихревых токах, возникающих в металлических подложках матриц на тонких пленках. В сб. «Магнитные элементы вычислительной техники», «Наука», 1966.
8-9. Кобелев В. В. Петли гистерезиса одноосных ферромагнитных пленок. В сб. «Магнитные элементы устройств вычислительной техники», изд-во АН СССР, 1961.
8-10. Кобелев В. В., Коперсако Н. Т. Исследование возможностей создания запоминающих элементов на ферромагнитных пленках со считыванием без разрушения информации. ИТМ и ВТ АН СССР, 1966.

8-11. Праттон М. Тонкие магнитные пленки. «Судостроение», 1967.
8-12. Сухy Р. Магнитные тонкие пленки (с дополнением — А. Пом, Запоминающие устройства на тонких магнитных пленках). «Мир», 1967.
8-13. Тонкие магнитные пленки. Сб. переводных статей под ред. В. М. Глушкова и Л. В. Киренского. Гостехиздат, УССР, 1963.
8-14. Тонкие ферромагнитные пленки. Сб. переводных статей под ред. Р. В. Телеснина. «Мир», 1964.
8-15. Увеличение быстродействия. «Электроника», 1966, т. 39, № 3.
8-16. Феддэ Дж. А. Запоминающие устройства на цилиндрических пленках. «Электроника», 1967, т. 40, № 10.
8-17. Anacker W. On the design and performance of a small 60-nsec destructive readout magnetic film memory. IBM J. Res. a. Developm., 1966, v. 10, № 1.
8-18. Barrett W. A. et al. A card changeable permanent-magnet-twistor memory of large capacity. Trans. IRE, 1961, v. EC-10, № 3.
8-19. Bate G. Thin metallic films for high-density digital recording. Trans. IEEE, 1965, v. MAG-1, № 3.
8-20. Bienhoff M., Camarata J., Sherman M. Some considerations in the design of plated wire memory systems. Proc. National Symposium on the Impact of Batch Fabrication of Future Computers, Los Angeles, Calif., April 6—8, 1965.
8-21. Billing H., Rüdiger A., Schilling R. A word-organized NDRO memory using fluted magnetic films. Trans. IEEE, 1966, v. MAG-2, № 3.
8-22. Bittman E. E. A 16 k-word, 2 Mc, magnetic thin-film memory. AFIPS Confer. Proc., 1964, v. 26.
8-23. Bobeck A. N. A new storage element suitable for large-sized memory arrays — the twistor. Bell Syst. Techn. J., 1957, v. 36, № 6.
8-24. Broadbent K. D. A vacuum evaporated random access memory, Proc. IRE, 1960, v. 48, № 10.
8-25. Edwards J. G. Investigation of some high-speed switching properties of magnetic films. Proc. IEE, 1965, v. 112, № 6.
8-26. Felt H., Harloff H. J. Flux keepers in magnetic thin-film memories. Abstracts of the Intermag Conf., 1966.
8-27. Higashi P. A thin-film rod memory for the NCR 315 RMC computer. Trans. IEEE, 1966, v. EC-15, № 4.
8-28. Howard R. A. et al. Investigation of woven-screen memory techniques, см. [1-31].
8-29. Judeinstein A. Measurement of magnetic properties of thin-films. Electronic Commun., 1966, v. 41, № 1.
8-30. Kashiwagi E., Murakami H. Highly reliable cylindrical thin magnetic film memory. Trans. IEEE, 1966, v. MAG-2.
8-31. Kaufman B. A., Ellinger P. B., Kuno H. J. A rotationally switched rod memory with a 100-nanosecond cycle time. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.
8-32. Kriessman C. J., Matcovich T. J., Flannery W. E. Low-power thin-film memory. Trans. IEEE, 1964, v. CE — , № 74.
8-33. Maeda H., Matsushita A. Woven thin-film wire memories. Trans. IEEE, 1965, v. MAG-1, № 1.
8-34. Maeda H., Matsushita A., Takashima M. Woven wire memory for NDRO system. Trans. IEEE, 1966, v. EC-15, № 4.
8-35. McCallister J. P., Chong C. F. A 500-nanosecond main computer memory utilizing plated-wire elements. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.
8-36. Meddaugh S. A., Pearson K. L. A 200-nanosecond thin film main memory system. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.
8-37. Meier D. A. Millimicrosecond magnetic switching and storage element. J. Appl. Phys., 1959, Suppl. to v. 30, № 4.
8-38. Meier D. A., Kolk A. J. The magnetic rod — a cylindrical, thin-film memory element, см. [1-31].

8-39. Meier D. A., Arbab M. Design characteristics for a 10 megacycle DRO rod memory, см. [1-29].
8-40. Methfessel S., Proebster W. E., Kilberg C. Thin magnetic films. Information processing, UNESCO, Paris — München — London, 1960.
8-41. Oakland L. J., Rossing T. D. Coincident-current nondestructive readout from thin magnetic films. J. Appl. Phys., 1959, Suppl. to v. 30, № 4.
8-42. Petschauer R. J. Engineering aspects of magnetic film memories. Trans. IEEE, 1965, v. MAG-1, № 3.
8-43. Pohm A. V. Magnetic film scratch-pad memories. Trans. IEEE, 1966, v. EC-15, № 4.
8-44. Pugh E. W., Shahan V. T., Siegle W. T. Device and array design for a 120-nanosecond magnetic film main memory. IBM J. Res. a. Developm., 1967, v. 11, № 2.
8-45. Ravi C. G., Koerber G. C. Effects of a keeper on thin film magnetic bits. IBM J. Res. a. Developm., 1966, v. 10, № 2.
8-46. Sie C. H. Nondestructive-readout coupled film memory device. J. Appl. Phys., 1966, v. 37, № 3.
8-47. Stapleton D. Magnetic thin film and ferrite core memories. Electron. Equipm. News, 1966, v. 8, № 7.
8-48. Stein K. U., Feldtkeller E. Switching properties of multilayer nickel-iron films with a ferrite keeper. Trans. IEEE, 1967, v. MAG-2, № 3.
8-49. Toombs H. D., Sevin I. J. A high speed NDRO film element, см. [1-29].
8-50. Turnquist R. D., Christiansen V. E., Hogenson C. O. A compact 166-kilobit film memory. IRE Internat. Convent. Rec., 1962, v. 10, pt. 4.
8-51. Waaben S. High-speed plated-wire memory system. Trans. IEEE, 1967, v. EC-16, № 3.
8-52. Webley R. S., Gibson A. T. The design of a magnetic thin-film store for commercial production. The Radio a. Electronic Eng., 1967, v. 33 № 3.

К главе девятой

9-1. Брюининг Г. Физика и применение вторичной электронной эмиссии. «Советское радио», 1958.
9-2. Вул Б. М. Сегнетоэлектрики. Изд-во АН СССР, 1956.
9-3. Деркач В. П. Электроннолучевые трубки для хранения двоичной информации. В сб. «Вопросы вычислительной техники», Киев, 1961.
9-4. Кноль М., Кэйзан Б. Электроннолучевые трубки с накоплением зарядов. Госэнергоиздат, 1955.
9-5. Курдов Л. И. Электроннолучевые накопители электрических сигналов. «Радиотехника», 1953, т. 8, № 5.
9-6. Кутуков Л. В., Гладышевская Г. А. Параллельное быстродействующее запоминающее устройство на конденсаторах и полупроводниковых диодах. ИТМ и ВТ АН СССР, 1957.
9-7. Кэнциг В. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Изд-во иностр. лит., 1960.
9-8. Лаут В. Н., Любович Л. А. Запоминающее устройство на электроннолучевых трубках быстродействующей электронной счетной машины Академии наук СССР. Изд-во АН СССР, 1957.
9-9. Смоленский Г. А., Исупов В. А. Сегнетоэлектрики. Серия «Полупроводники», вып. 16, 1956.
9-10. Ходаков А. Л. Исследование петель гистерезиса сегнетоэлектриков и нелинейных конденсаторов. Ученые записки Ростовского государственного ун-та, 1958, т. 68, вып. 8.

9-11. Червинский М. М. Сегнетоэлектрики и перспективы их применения в вычислительной технике. Госэнергоиздат, 1962.
9-12. Якимов Н. Н., Бернашевский Г. А. Электроннолучевые приборы. Сб. «Успехи электровакуумной техники», под ред. Г. А. Тягунова, Госэнергоиздат, 1956.
9-13. Яснопольский Н. Л., Алексеева А. П. Механизм действия электроннолучевых запоминающих трубок с сеткой-барьером для цифровых счетных машин. «Радиотехника и электроника», 1958, т. 3, № 1.
9-14. Ault C. F. Stable high-speed digital-to-analog conversions for storage tube deflection. Bell System Techn. J., 1959, v. 38, № 2.
9-15. Campbell D. S. Barium titanate and its use as a memory store. J. Brit. IRE, 1957, v. 17, № 7.
9-16. De Lano R. B. A large-capacity storage tube for digital computer applications. Convent. Record of IRE, 1954.
9-17. Ferroelectrics. Switching properties, logic and memory devices. Electromechan. Design, 1966, v. 10, № 10.
9-18. Herbert J. M. Memory systems using ferroelectrics, см. [1-29].
9-19. Guinet P., Coeure P. H., Bertaut E. F. Propriétés ferroélectriques de $MnYO_3$ en vue de l'application aux mémoires, см. [1-29].
9-20. Hines M. E., Chruney M., McCarthy J. A. Digital memory in barrier-grid storage tubes. Bell System Techn. J., 1955, v. 34, № 6.
9-21. Holt A. W. Diode-capacitor memory for computers. Radio a. Telev. News, 1954, v. 51, № 2.
9-22. Kaufman M. M. Millimicrosecond diode capacitor memory. Proc. Nat. Electronics Confer., v. 15, Chicago, Nat. Electron. Confer., Inc., 1960.
9-23. Litting C. N. W. The physics of cathode-ray storage tubes. J. Scient. Instruments, 1954, v. 31, № 5.
9-24. Maughmer J. M., Huskey H. D. A study of refill phenomena in Williams' tube memories. Trans. IRE, 1958, v. EC-7, № 1.
9-25. Merz W. J. Switching time in ferroelectric $BaTiO_3$, and its dependence on crystal thickness. J. Appl. Phys., 1956, v. 27, № 8.
9-26. Morleigh S. Ein dielektrischer Trommelspeicher. «Automatik», 1962, Bd. 7, № 4.
9-27. Prutton M. Ferroelectrics and computer storage. J. Brit. IRE, 1959, v. 19, № 2.
9-28. Pulvari C. F., McDuffie G. E. Scanners for ferroelectric memory capacitors. Trans. IRE, 1958, v. EC—7, № 1.
9-29. Rosenblatt A. Super-scale computers: 3 approaches. Electron. Design, 1964, v. 12, № 24.
9-30. Schualer D. G. Ferroelectric ceramic logic and NDRO memory devices. WESCON Techn. Papers, 1966, № 3.
9-31. Taylor G. W. Utilization of the partial switching properties of ferroelectrics in memory devices. Trans. IEEE, 1965, v. 14, № 6.
9-32. Wieder H. H. Some aspects of information storage in ferroelectrics, см. [1-31].
9-33. Williams F. C. et al. Recent advances in cathode-ray storage. Proc. IRE, 1953, v. 100, part 2, № 1.
9-34. Yu Tiong Suy, Dunn Hugh K. Experiment in ferroelectric-tape recording. J. Acoust. Soc. America, 1966, v. 39, № 6.

К главе десятой

10-1. Абросимов И. Л., Алескеров С. А., Лиждвой Л. Г. Построение запоминающей матрицы на туннельных диодах. «Автоматика и вычислительная техника», 1966, № 14.
10-2. Бойсел Л. Память на пластинке кремния — очередной шаг к большим интегральным системам. «Электроника», 1967, т. 40, № 3.
10-3. Вуль В. А. Запоминающие элементы на туннельных диодах со статическим представлением и неразрушающим радиочастотным считыванием информации. «Автоматика и вычислительная техника», 1967, № 4.

10-4. Глушковский М. Е. Структура буферного запоминающего устройства на туннельных диодах. Труды союзного НИИ приборостроения, 1967, вып. 5.

10-5. Гострем Р. В., Зиновьев Г. С. Туннельные диоды и их применение. РИО СОАН СССР, Новосибирск, 1964.

10-6. Кармазинский А. Н. и др. Анализ и расчет элементов схем ЦВМ с непосредственными связями на МОП транзисторах. В сб. «Микроэлектроника», под ред. Ф. В. Лукина, «Советское радио», 1967.

10-7. Кеонджан Э. и др. Микроэлектроника. «Советское радио», 1966.

10-8. Киреев Б. Б., Неупокоев Б. А. Полупроводниковые элементы ЭЦВМ. «Советское радио», 1964.

10-9. Климов В. В. Запоминающие ячейки на туннельных диодах со считыванием без разрушения информации, см. [1-20].

10-10. Кодзима Т., Ватанабе М. Развитие полупроводниковой промышленности и техники миниатюризации. «Электроника», 1965, т. 38, № 25.

10-11. Кононов Б. Н., Орликовский А. А. Применение туннельных диодов в быстродействующих устройствах хранения информации. Изв. вузов, «Радиотехника», 1963, т. 6, № 1.

10-12. Кэннинг М. и др. ЗУ на активных элементах с избирательными межсоединениями. «Электроника», 1967, т. 40. № 4.

10-13. Малин Б. В. и др. Микроминиатюризация полупроводниковых устройств хранения дискретной информации. В сб. «Микроэлектроника», под. ред. Ф. В. Лукина, «Советское радио», 1967.

10-14. Павловский Я. Н., Докин Р. С. Быстродействующее оперативное запоминающее устройство на туннельных диодах с ассоциативной выборкой адреса. «Автоматика и вычислительная техника», Рига, 1966, № 14.

10-15. Петров А. Н. Запоминающее устройство на туннельных диодах. «Автоматика и вычислительная техника», 1966, № 14.

10-16. Поттер Дж. и др. Новое поколение вычислительных машин с буферными ЗУ на интегральных схемах. «Электроника», 1966, т. 39, № 7.

10-17. Трайто Б. Г. О выборе структуры статического запоминающего устройства на туннельных диодах, см [1-20].

10-18. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 2, «Энергия», 1967.

10-19. Фарина Д. Е., Троттер Д. Уменьшение размеров и стоимости аппаратуры путем использования интегральных схем со структурой металл — окисел — полупроводник. «Электроника», 1965, т. 38, № 20.

10-20. Ahrons R. W., Gardner P. D. Open the gate to nanopower IC logic, Electron. Design, 1967, v. 15, № 19.

10-21. Catt J. et al. A high-speed integrated circuit scratchpad memory. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.

10-22. Crawford D. J. et al. An improved tunnel diode memory system. IBM J. Res. a. Developm., 1963, v. 7, № 3.

10-23. Earnshaw J. B. Design for a tunnel diode transistor store with nondestructive readout of information. Trans. IEEE, 1964, v. EC-13, № 6.

10-24. Friedrich J. H. A flexible microcircuit scratchpad. EEE-Circuit Design Engng., 1966, v. 14, № 12.

10-25. Greiller R. Steuerbare Vierschicht-Halbleiter und ihre Verwendung als Binärspeicher. «Elektronische Rechenanlagen», 1965, Bd. 7, № 6.

10-26. Kaufman M. M. et al. Tunnel diode memory. IEEE Internat. Convent. Rec., 1964, v. 12, № 1.

10-27. Miniaturized memory devices. Computers a. Automation, 1966, v. 15, № 1.

10-28. Neale J. D., Cole A. J. Design and construction for a 2048 bit tunnel diode store with a 120 nsec cycle time, см. [1-29].

10-29. Nguyen-huu A., Murphy R. H. Solid-state h. l. t. t. l. 16-bit memory element. Electron. Engng., 1967, v. 39, № 476.

10-30. P a s q u a l i n i R. Design considerations for a parallel bit-organized MOS memory. Trans. IEEE, 1967, v. EC-16, № 5.
10-31. P l e s h k o P., T e r i a n L. M. An investigation of the potential of MOS transistor memories. Trans. IEEE, 1966, v. EC-15, № 4.
10-32. P u y c h e v r i e r N. et al. Diodes tunnel de technologie simple pour mémoires rapides, см. [1-29].
10-33. R i c h A. W. A solid state store. «Applications of microelectronics», 1966, № 14.
10-34. W o o d J., B a l l R. G. Metal oxide semiconductor transistors in digital logic and storage. The Radio a. Electronic Eng., 1966, v. 32, № 1.

К главе одиннадцатой

11-1. А р т е м е н к о Г. А., В о й т о в и ч І. Д., М и х а й л о в Г. О. Статичні характеристики плівкових кріотронів. Український фізичний журнал, 1963, т. 8, № 7.
11-2. Б а н д м а н О. Л. Применение криотронов для реализации элементов вычислительной среды. «Вычислительные системы», Труды симпозиума, г. Новосибирск, май 1966 г., Новосибирск, 1967.
11-3. Б е р к о в и ч С. Я. О построении запоминающих устройств из сверхпроводящих элементов с захваченным потоком. ИТМ и ВТ АН СССР, 1963.
11-4. Б е р к о в и ч С. Я. Устойчивость и переключение тока в сверхпроводящем запоминающем элементе. «Радиотехника и электроника», 1963, т. 8. вып. 2.
11-5. Б р е м е р Д ж. Сверхпроводящие устройства. «Мир», 1964.
11-6. В о й т о в и ч И. Д. Допуски на управляющие токи в криотронном запоминающем устройстве. В сб. «Кибернетическая техника», «Наукова думка», Киев, 1965.
11-7. В о й т о в и ч І. Д., К а н Я. С., Р а х у б о в с ь к и й В. А. Аналіз кріотронної запам'ятовуючої схеми з багатьма стійкими станами. «Автоматика», 1966, № 6.
11-8. Г е й н д ж Р. А. Принципы построения быстродействующих криоэлектрических запоминающих устройств большой емкости. «Электроника» 1967, т. 40, № 8.
11-9. Д у б р о в с к а я А. Е., З и м а р е в А. И. Криогенные запоминающие элементы с захваченным потоком. ИТМ и ВТ АН СССР, 1962.
11-10. К а н Я. С., М и х а й л о в Г. А., Р а х у б о в с к и й В. А. Макет ЦВМ на криотронах с программным управлением. В сб. «Механизация и автоматизация управления», 1966, № 3, (27).
11-11. К р а й з м е р Л. П. Новые элементы электронных цифровых машин. Госэнергоиздат, 1961.
11-12. Криоэлектрическое запоминающее устройство. «Электроника», 1967, т. 40, № 7.
11-13. К у з н е ц о в В. Ф. и др. Исследование сверхпроводниковых запоминающих элементов. «Вычислительные системы», Труды симпозиума, г. Новосибирск, май 1966 г., Новосибирск, 1967.
11-14. Л а м б е р т Л. М., М а к е т и р Д ж. Криосар — перспективный элемент для вычислительных машин будущего. «Электроника», 1962, т. 35, № 33.
11-15. М а т в е е н к о Н. А. Запоминающие устройства на сверхпроводящих пленочных элементах (обзор). «Зарубежная радиоэлектроника», 1967, № 4.
11-16. Н е п л ю е в Л. Н., Ф е д о р о в В. Б. Использование криогенных явлений в технике. «Зарубежная радиоэлектроника», 1961, № 6.
11-17. П е р л Д ж. Вихри в сверхпроводниках и возможность построения принципиально новых магнитных элементов вычислительных машин. «Электроника», 1966, т. 39, № 12.
11-18. У о к е р П. Криотроны и криотронные схемы. «Зарубежная радиоэлектроника», 1963, № 10.

11-19. Ченцов Р. А. О надежности матрицы из сверхпроводящих запоминающих элементов Кроу. ИТМ и ВТ АН СССР, 1962.
11-20. Шенберг Д. Сверхпроводимость. Изд-во иностр. лит. 1955.
11-21. Bejat J., Menoret M., Pawlowsky D. Etude et réalisation de matrices des mémoires a «cryosars», см. [1-29].
11-22. Brennemann A. E. The in-line cryotron. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 3.
11-23. Buck D. A. The cryotron — a superconductive computer component. Proc. IRE. 1956, v. 44, № 4.
11-24. Burns L. L. et al. Continuous-sheet superconductive memory. «Solid State Electronics», 1960, v. 1.
11-25. Burns L. L., Jr. Cryoelectric memories. Proc. IEEE, 1964, v. 52, № 10.
11-26. Edwards H. H., Newhouse V. L. Analysis of the cryogenic continuous film memory. Trans. IEEE, 1965, v. MAG-1.
11-27. Feissel H., Gallet F. Caractéristiques principal des éléments de mémoires a plan supraconducteur continu, см. [1-29].
11-28. Goser K. Ein wortorganisierter supraleitender Schichtspeicher. «Elektronische Rechenanlagen», 1967, Bd. 9, № 6.
11-29. Goser K., Kadereit H. G., Kirchner H. Supraleitende Schalt-und Speicherelemente. «Elektronische Rechenanlagen», 1966, Bd. 8, № 6.
11-30. Haynes M. K. Cryotron storage, arithmetic and logical circuits, «Solid-State Electronics», 1960, v. 1.
11-31. Kadereit H. G. Investigations on trapped flux in cryogenic continuous film memory cells. Trans. IEEE, 1966, v. MAG-2, № 3.
11-32. Newhouse V. L. Applied superconductivity. Wiley, N. Y., 1964.
11-33. Newhouse V. L., Edwards H. H. Cryotron storage cells for random access memories. Radio a. Electronic Engr., 1967, v. 33, № 3.
11-34. Pritchard J. P. Superconducting thin film technology and applications. IEEE Spectrum, 1966, v. 3, № 5.
11-35. Richards N. D. The design of large cryotron memories. Trans. IEEE, 1966, v. MAG-2, № 3.
11-36. Sass A. R., Nagle E. M., Burns L. L. Three-wire cryoelectric memory systems, Trans. IEEE, 1966, v. MAG-2, № 3.
11-37. Slade A. E., The cryocell a large, random access, superconductive memory, см. [1-29].
11-38. Yang C. C., Tou J. T. A cryogenic associative memory. J. Franklin Inst., 1967, v. 284, № 2.

К главе двенадцатой

12-1. Белов К. П. Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Гостехиздат, 1957.
12-2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. Изд-во иностр. лит., 1957.
12-3. Бережной Е. Ф. Оперативный регистр на магнитострикционной линии задержки. ИТМ и ВТ АН СССР, 1958.
12-4. Глебович Г. В. Магнитострикционная линия задержки с ферритовыми преобразователями. Труды Горьковского политехнического ин-та, 1958, т. 14, вып. 5.
12-5. Голышко В. Ф., Сильвинская К. А. Линии задержки с сосредоточенными параметрами. «Электросвязь», 1958, № 11.
12-6. Использование техники сантиметровых волн в вычислительных машинах (обзор). «Зарубежная радиоэлектроника», 1960, № 8.
12-7. Козырь А. И., Кузнецов К. Ф., Рогушин И. И. Магнитострикционная линия задержки в качестве запоминающего устройства многоканального анализатора. В сб. «Ядерное приборостроение», вып. 1, Атомиздат, 1964.

12-8. Ротбарт А., Браун А. Магнитострикционные линии задержки. «Электроника», 1962, т. 35, № 15.
12-9. Сухомлинов М. М. и др. Запоминающее устройство на магнитострикционных линиях задержки для последовательных вычислительных машин, см. [1-20].
12-10. Allen R. J. Superconductive delay line memory. «Electromech. Design», 1964, v. 8, № 8.
12-11. Brockelsby C. F., Falfreeman J. S., Gibson R. W. Ultrasonic delay lines. London Iliffe Books, 1963.
12-12. Crofut W. A., Sottile M. R. Design techniques of a delay-line content-addressed memory. Trans. IEEE, 1966, v. EC-15, № 4.
12-13. Gibson R. W., Solid ultrasonic delay lines. «Ultrasonics», 1965, v. 3, Apr. — June.
12-14. Hayes R. E., Alshord R. W. Ferroacoustic delay line. «Colloque International de Commutation Electronique», Paris, 1966.
12-15. Konrad M. A simple decimal read and print out system for amplitude analysers with magnetostrictive wire memory, см. [1-29].
12-16. Lebail P. Ligne coaxial supraconductrice miniature pour retard et mise en mémoire d'impulsions nanoseconde. «Colloque International de Commutation Electronique», Paris, 1966.
12-17. May J. E. Low-loss 1000 microsecond ultrasonic delay lines. Trans. IRE, 1956, v. PGUE-4.
12-18. Meitzler A. H. Ultrasonic delay lines for digital data storage. Trans. IRE, 1962, v. UE-9, № 2.
12-19. Meitzler A. H. Ultrasonic delay lines used to store digital data. Bell Labs. Rec., 1964, v. 42, № 9.
12-20. Monds F. C., Rosie A. M. Theory and performance of a static magnetostrictive delay-line store. Proc. IEE, 1966, v. 113, № 12.
12-21. Nisiguti Katumi, Sato Nidekichi. Study of magnetostrictive delay lines. Rev. Electr. Commun. Lab., 1964, v. 12, № 12.
12-22. Obrocka A., Drużynski J. Magnetostriktiver Speicher. «Nachrichtentechnik», 1967, № 2.
12-23. Scarrot G. G., Harwood W. J., Johnson K. C. Electromagnetic delay networks for digital storage. Proc. IRE, 1956, v. 103, p. B, Suppl. № 3.
12-24. Rentsch W. Probleme magnetostriktiver Speicher mit hoher Speicherkapazität. «Nachrichtentechnik», 1967, № 5.
12-25. Rentsch W. Beitrag zu Theorie und Anwendungen magnetostriktiver Verzögerungsleitungen. «Nachtrichtentechnik», 1967, № 6.
12-26. Starr B. G., Burnham N. Q. Low-cost data storage with delay lines — practical systems. «Ultrasonics», 1966, v. 4, Jan.
12-27. Williams R. C. Theory of magnetostrictive delay lines for pulse and continuous wave transmission. Trans. IRE, 1959, v. PGUE-7.

К главе тринадцатой

13-1. Алехин В. И. Анализ построения оптикоэлектронных устройств обработки информации. «Приборы и системы автоматики», 1967, вып. 5.
13-2. Брей Т. Оптикоэлектронные логические и запоминающие матрицы, см. [13-11].
13-3. Веников Г. В. Сверхбыстродействующие вычислительные устройства. «Энергия», 1966.
13-4. Гоффман Г., Джеффрейс Д. Постоянная память вычислительной машины со считыванием информации световыми импульсами, см. [13-11].
13-5. Де Негри Ф. П. Оптические постоянные запоминающие устройства для малогабаритных систем. «Электроника», 1964, т. 37, № 14.
13-6. Калке У. и др. Быстродействующее устройство отклонения луча света по адресному коду, см. [13-11].

13-7. Клапп Л. Память и логика в оптической вычислительной машине. см. [13-11].
13-8. Майоров С. А., Бойцов В. А. Магнитнооптические запоминающие устройства со считыванием информации световым лучом. Изв. вузов, «Приборостроение», 1967, т. 10, № 2.
13-9. Нельсон Т. Устройство дискретного отклонения светового луча. см. [13-11].
13-10. Никитюк Н. М. Свет, кванты и вычислительная техника. «Знание», 1967.
13-11. Оптическая обработка информации. Сб. статей, пер. с англ., под ред. С. П. Ерковича, «Мир», 1966.
13-12. Поттер Р., Уотсон Т. Оценка элементов для оптического устройства обработки данных, см. [13-11].
13-13. Савостьянова М. В., Чиков К. Н. Исследования условий фиксирования информации фотоскопическим методом на фотохромной пленке. «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 11.
13-14. Сороко Л. М. Голография и интерференционная обработка информации. УФН, 1966, т. 90, вып. 1.
13-15. Строук Дж. Введение в когерентную оптику и голографию. «Мир», 1967.
13-16. Стюарт Р. Д. Оптические запоминающие устройства. «Электроника», 1966, т. 39, № 4.
13-17. Фуллер В. Оптикоэлектроника — новая отрасль современной электроники, см. [13-11].
13-18. Хирден П. Дж. Новый оптический метод накопления и выборки информации. «Зарубежная радиоэлектроника», 1963, № 10.
13-19. Хирден П. Дж. Теория оптического запоминающего устройства на твердом теле. «Зарубежная радиоэлектроника», 1964, № 2.
13-20. A 10^{13} bit mass memory reads and writes with laser. Computer Design, 1967, v. 6, № 3.
13-21. Bairstow J. N. Billion-bit holographic memories by 1970. Electronic Design, 1967, v. 15, № 23.
13-22. Bass J. C. A review of electro-optic beam deflection techniques. «The Radio and Electronic Engineer», 1967, v. 34, № 6.
13-23. Beauclair W. Optisches Speichern und Lesen zur wahlfreien Informations-Ausgabe. «Automatik», 1967, № 6.
13-24. Becker C. H. UNICON computer mass memory system. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.
13-25. Bryan J. S., Focht L. R. The cathode-ray tube as a commutating device in large-capacity, random-accecs story, см. [1-31].
13-26. Chang J. T. Magneto-optical variable memory based upon the properties of a transparent ferrimagnetic garnet at its compensation temperature. J. Appl. Phys., 1965, v. 36, № 3, pt. 2.
13-27. Deschamps R. Dispositifs optoelectroniques a mémoires, см. [1-29].
13-28. Fasano G. et al. Mémoires semi-permanentes à diodes et éléments photosensibles, см. [1-29].
13-29. Forlani F., Minnaja N. A proposal for a magneto-optical variable memory. Proc. IEEE, 1966, v. 54, № 4.
13-30. Hoffman G. R., Jones P. L. An electroluminescent fixed store for a digital computer. Proc. IEE, 1962, v. B109, № 44.
13-31. Hoower C. W., Haugk G. The flying spot store, см. [1-31].
13-32. Kallman H. Photo electric memories, см. [1-29].
13-33. King G. W., Brown F. W., Ridenour L. N. Photographic techniques for information storage. Proc IRE, 1953, v. 41, № 10.
13-34. Kuehler J. D., Kerby H. R. A photo-digital mass storage system. AFIPS Confer., 1966, v. 29.
13-35. Kulcke W. et al. Digital light deflectors. Applied Optics, 1966, v. 5, № 10.

13-36. Lamberts R. L., Higgins G. S. A system of recording digital data on photographic film using superimposed grating patterns. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.
13-37. Lunder S. L., Hoover C. W. Improved performance from matrix electroluminescent screens in optical readout applications, см. [1-31].
13-38. Litz F. A., Critchlow A. I. Direct access photomemory. Proc. West. Joint Comput. Confer., Los Angeles, Calif., 1958.
13-39. Mayer L. J. Magnetic recording with an electron beam, см. [1-31].
13-40. Newberry S. P. An electron optical technique for large capacity random-access memories. AFIPS Confer. Proc., 1966, v. 29.
13-41. Poppelbaum W. J. Electro-optical information processing. Proc. IFIP Congress-65, 1965.
13-42. Ramberg E. G. The hologram — properties and applications. RCA Rev., 1966, v. 27, № 4.
13-43. Smits G. M., Gallaher L. E. Design considerations for a semipermanent optical memory. Bell System Techn. J., 1967, v. 46, № 6.
13-44. Surgan D. H. «See through» ceramics create optical memory. Electronic Design, 1967, v. 15, № 23.
13-45. Thornley R. F. M., Brown A. V., Speth A. J. Electron beam recording of digital information. Trans. IEEE, 1964, v. EC-13, № 1.
13-46. Van Santen J. G. Opto electronic circuits, см. [1-29].

К главе четырнадцатой

14-1. Авдеенкова Л. М., Корольков Н. В., Максимова В. Н., Трефилов В. М. Долговременные (постоянные) запоминающие устройства для ЦВМ. Вычислительный центр АН СССР, 1963.
14-2. Аксенова С. В. Возможности построения долговременного запоминающего устройства на печатных индуктивных элементах. Труды ЦНИИМФ, вып. 59, 1964.
14-3. Алонзо Р. Л. Изготовление ПЗУ трансформаторного типа на жаккардовых ткацких станках. «Электроника», 1967, т. 40, № 9.
14-4. Амбросович В. Д., Кац Д. А., Чернышев В. Е. Долговременное запоминающее устройство с четырехкоординатным выбором. «Автоматические и телеинформационные системы». Сб. статей, «Наука», 1965.
14-5. Баранов В. С. Долговременное запоминающее устройство на ферритовых стержнях с записью информации на перфокартах. Труды Тбилисского научно-исследовательского института приборостроения и средств автоматизации, 1962, т. 3.
14-6. Брик Е. А. Постоянные запоминающие устройства цифровых машин. «Энергия», 1969.
14-7. Зыков Ф. Н., Кривич Г. И., Петрусенко С. К. Долговременное запоминающее устройство. В сб. «Механизация и автоматизация управления», № 3 (27), 1966.
14-8. Кикнадзе Л. Г., Сихарулидзе Т. Г. Одностороннее ЗУ типа Z машины БЭСМ-2. «Вопросы вычислительной техники», 1966, т. 7, вып. 2, Вычислительный центр АН ГССР, «Мецниереба», 1966.
14-9. Меньшиков Г. Г. Сетка из сопротивлений в постоянных запоминающих устройствах. Труды ЛЭИС, вып. 7 (44), 1959.
14-10. Петров А. В. Некоторые принципы построяния ДЗУ. «Вычислительная техника». Сб. № 5, под ред. Б. В. Анисимова, «Машиностроение», 1966.
14-11. Петров А. В., Виноградов В. И. Долговременная память на металлических картах. «Вычислительная техника». Сб. № 5, под ред. Б. В. Анисимова, «Машиностроение», 1966.
14-12. Петров В. В. О возможности построения пассивного ЗУ на матрице сопротивлений. «Управляющие машины и системы», семинар, вып. 1, Киев, 1967.
14-13. Butcher I. R. A prewired storage unit. Trans. IEEE, 1964, v. EC-13, № 2.

14-14. Endo I., Yamato J. The metal card memory — a new semipermanent store, см. [1-31].
14-15. Feustel O. Elektronische Zuordner. «Elektronische Rechenanlagen», 1965, Bd. 8, № 1.
14-16. Foglia H. R., Mc Dermid W. L., Petersen H. E. Card capacitor — a semipermanent read-only memory. IBM J. Res. and Dev., 1961, v. 5, № 1.
14-17. Gianola U. F. et al. Large — capacity card changeable permanent magnet twistor memory, см. [1-31].
14-18. Haskell J. W. Design of printed card capacitor read-only store. IBM J. Res. and Dev., 1966, v. 10, № 2.
14-19. Hsia Yukun. Solenoid — coupled read-only memory. Trans. IEEE, 1967, v. EC-16, № 3.
14-20. Lewin M. H., Beelitz H. R., Guarracini J. Fixed resistor card memory. Trans. IEEE, 1965, v. EC-14, № 3.
14-21. Miller J. C., Wine C. M. Apertured sheet read-only memory, Trans. IEEE, 1966, v. M-2, № 4.
14-22. Oshima S. et al. Semi — permanent memory device, см. [1-29]
14-23. Painke H. Der Festwertspeicher in digitalen Rechenanlagen. «Elektronische Rechenanlagen», 1966, Bd. 8, № 1.
14-24. Schaefer E. Elektronische Auslesespeicher, Elektron. Rechenanlagen, 1961, Bd. 3, № 5.
14-25. Takahashi S., Watanabe S. Capacitance type fixed, memory, см. [1-31].
14-26. Taub D. M. Analysis of sneak paths and sense-line distortion in an improved capacitor read-only memory. Proc. IEEE, 1963, v. 51, № 11.

К главе пятнадцатой

15-1. Анисимов А. П. и др. Адресный привод запоминающих устройств на ферритах. Дубна, 1963.
15-2. Афиногенов Л. П. Логические и коммутационные ферритовые схемы, основанные на распределении токов. «Технические средства автоматизации и телемеханизации», вып. 5, ЦИТЭИН, 1961.
15-3. Барилко Ш. И. и др. Адресный привод запоминающих устройств на ферритах. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 5.
15-4. Валявко В. В. Форсирование переходных процессов в диодном матричном дешифраторе. В сб. «Вычислительная техника», под ред. А. М. Оранского, «Наука и техника», Минск, 1964.
15-5. Ефремов В. Д., Калинг В. А., Мараховский В. Б. Принцип распределения тока и перспективы его применения для цифровых устройств. «Цифровые измерительные и управляющие устройства», Труды ЛПИ, № 256, «Энергия», 1965.
15-6. Зыков Ф. Н. Об одном способе синтеза дешифраторов с разделенной нагрузкой. «Кибернетическая техника», «Наукова думка», Киев, 1965.
15-7. Колосов В. Г. Новый метод построения дискретных схем на принципе распределения тока. «Ученые записки аспирантов и соискателей ЛПИ им. Калинина. Электроизмерительная техника и автоматика», 1963.
15-8. Косинский Л. Н. Экономичные схемы вентильных дешифраторов. Сборник научных трудов ЦНИИС, 1961, вып. 2.
15-9. Косинский Л. Н. Электрический расчет вентильных дешифраторов. Сборник научных трудов ЦНИИС, 1962, вып. 1.
15-10. Кочетов А. Е. К расчету дроссельного магнитного дешифратора. «Приборостроение», 1965, № 8.
15-11. Кутняков В. И. Логические схемы на туннельных диодах и транзисторах. М., 1964.
15-12. Мелехин В. Ф. Схемы дешифраторов и схемы сравнения на принципе распределения тока, реализующие свои функции в такт ввода

информации. «Ученые записки аспирантов и соискателей ЛПИ им. Калинина. Электроизмерительная техника и автоматика», 1963.
15-13. Образцов В. В. Малоэлементные дешифраторы. «Техническая кибернетика», 1965, № 1.
15-14. Роудз У. и др. Память на ферритовых сердечникеах с временем обращения 0,7 *мксек*. «Зарубежная радиоэлектроника», 1962, № 4.
15-15. Рыжков В. И., Сычев Б. П. Оперативное запоминающее устройство на ферритовых сердечниках с полупроводниковым управлением. «Труды НИИ», вып. 20, Судпромгиз, 1963.
15-16. Самуйлова В. Н., Валевко В. В., Самуйлов Н. Н. Быстродействующий полупроводниковый дешифратор. В сб. «Вычислительная техника», под ред. А. М. Оранского, изд-во «Наука и техника», Минск, 1965.
15-17. Самуйлова В. Н. Методика расчета схем форсирования полупроводникового дешифратора. В сб. «Вычислительная техника», под ред. А. М. Оранского, изд-во «Наука и техника», Минск, 1965.
15-18. Харкевич А. А. Спектры и анализ. Физматгиз, 1962.
15-19. Хаски Г. Д., Корн Г. А. Вычислительная техника, т. II, «Энергия», 1964.
15-20. Чжоу С. Н., Кьюберт К. М. Наносекундная переключательная схема на туннельных диодах с накоплением заряда. «Электроника», 1963, т. 36, № 42.
15-21. Amemiya H., Mayhew T. R., Pryor R. L. A 10^5-bit high-speed ferrite memory system — design and operation. AFIPS Fall Joint Computer Conference, 1964.
15-22. Anacker W., Bland G. F., Stuckert P. E. On the design and performance of a small 60-nsec destructive readout magnetic film memory. IBM J. Res. and Dev., 1966, vol. 10, № 1.
15-23. Constantine C. T. A load-sharing matrix switch. IBM J. Res. and Dev., 1958, v. 2, № 3.
15-24. Edwards D. B. G., Laningan M. J., Kinniment D. J. High-speed ferrite-core storage system, Electronics Record, 1964, vol. 111, October.
15-25. Goldstick G. H., Klein E. F. Design of memory sense amplifiers. Trans. IRE, 1962, v. EC-11, № 2.
15-26. Kaufman B. A., Hammond J. S. A high-speed direct-coupled magnetic memory sense amplifier employing tunnel diode discriminators. Trans. IRE, 1963, v. EC-12, № 3.
15-27. Minnick R. C., Haynes J. L. Magnetic core access switches. Trans. IRE, 1962, v. EC-11, № 3.
15-28. Neumann P. G. On the logical design of noiseless load-sharing matrix switches. Trans. IRE, 1962, v. EC-11, № 3.
15-29. Pohm A. V. et al. Large high speed DRO film memories. INTERMAG Conf., 1963.
15-30. Takahasi H., Goto E. Application of error-correcting codes to multiway switching. Internat. Confer. Information Processing, UNESCO, 1959.
15-31. Tsui F. F. Improving the performance of the sence-amplifier circuit through pre-amplification strobing and noise-matched clipping. Trans. IRE, 1962, v. EC-11, № 5.
15-32. Veith P. Ferritschaltkerne in Auswahleinrichtungen für Speichermatrizen. Elektronik, 1962, № 1.

К главе шестнадцатой

16-1. Альянах И. Н., Гольдштейн И. А., Крайзмер Л. П. Анализ надежности дешифраторов. Труды СЗПИ, № 1, 1967.
16-2. Балашов Е. П., Генкин В. Л., Смолов В. Б. Возможные критерии оценки информационной надежности магнитных накопителей. В сб. «Магнитные элементы вычислительной техники», «Наука», 1966.

16-3. Брик Е. А., Альянах И. Н. Схемный контроль дешифраторов и числовых блоков запоминающих устройств. Труды СЗПИ, № 1, 1967.

16-4. Вайрадян А. С. Надежность электронных вычислительных машин. Изд. МИФИ, 1966.

16-5. Ватник П. А. Применение контрольных символов для контроля ЗУ. Труды Ленинградского инженерно-экономического ин-та, вып. 55, 1965.

16-6. Вычислительная техника (Сб. № 5). Сб. статей под ред. Б. В. Анисимова, МВТУ, «Машиностроение», 1966.

16-7. Герсбах Дж. Е. Автоматическое построение характеристик безошибочной работы ферритового ЗУ. «Электроника», 1966, т. 39, № 15.

16-8. Гильман А. С. Некоторые вопросы надежности управляющих вычислительных машин. Труды ЦНИИ комплексной автоматизации, вып. 8, изд. ЦНИИКА, 1964.

16-9. Глузман Г. Л., Падерно И. П. Надежность установок и систем управления. «Машиностроение», 1966.

16-10. Гольдбаум И. Я., Иыуду К. А. Применение кодирования с обнаружением и исправлением ошибок для повышения надежности ЗУ. Научно-технический информационный бюллетень № 21, ЛПИ, 1960.

16-11. Гусев А. В. Физические основы некоторых испытательных программ для магнитных оперативных запоминающих устройств. В сб. «Цифровая вычислительная техника и программирование», под ред. А. И. Китова, вып. 1, «Советское радио», 1966.

16-12. Дашевский Л. Н., Погребинский С. Б., Шкабара Е. А. Вычислительная машина «Киев» (проектирование и эксплуатация). «Техніка», Киев, 1964.

16-13. Дашевский Л. Н., Гольдштейн И. А., Зубатенко А. Я. Надежность запоминающих устройств. В сб. «Запоминающие устройства», под ред. Л. П. Крайзмера, «Энергия», 1968.

16-14. Диагностика неисправностей вычислительных машин. Сб. статей, «Наука», 1965.

16-15. Заренин Ю. Г. Корректирующие коды для передачи информации. «Техніка», Киев, 1965.

16-16. Коды с обнаружением и исправлением ошибок. Сб. переводов под ред. А. М. Петровского, Изд-во иностр. лит., 1965.

16-17. Короленок-Горский Л. К. Некоторые вопросы анализа надежности запоминающих устройств, см. [1-20].

16-18. Коц У. Коды с исправлением ошибок и их реализация в цифровых системах, см. [16-21].

16-19. Луцкий В. А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры. Изд-во АН УССР, 1963.

16-20. Месяцев П. П. Надежность производства электронно-вычислительных машин. Машгиз, 1963.

16-21. Методы внедрения избыточности для вычислительных систем. Сб. переводных статей под ред. В. С. Пугачева, «Советское радио», 1966.

16-22. Миронов Г. А. Испытательные программы для контроля электронных цифровых машин. Под ред. И. А. Криницкого, «Наука», 1964.

16-23. Половко А. М. Основы теории надежности. «Наука», 1964.

16-24. Рабинович В. И., Тимонен Л. С. Проблемы технической диагностики. В сб. «Информация и кибернетика», под ред. А. И. Берга, «Советское радио», 1967.

16-25. Савченко Ю. Г., Адамович Л. В. К вопросу о применении кода Хемминга для повышения надежности ЗУ на магнитной ленте. «Кибернетическая техника», Республиканский межведомственный сборник, «Наукова думка», Киев, 1965.

16-26. Самойленко С. И. Помехоустойчивое кодирование. «Наука», 1966.

16-27. Тодуа Д. А. Устойчивость некоторых систем магнитных оперативных запоминающих устройств (МОЗУ). «Управляющие вычислительные машины и системы», Труды ТНИИСА, «Энергия», 1967.

16-28. Тодуа Д. А. К вопросу надежности магнитного оперативного запоминающего устройства. Труды ТНИИСА, т. 7, «Энергия», 1966.
16-29. Трайтон Дж. Учетверенная логика, см. [16-21].
16-30. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Физматгиз. 1963.
16-31. Chien R. T., Orthogonal matrices, error-correcting codes and load-sharing matrix switches. Trans. IRE, 1959, v. EC-8, № 3.
16-32. Dańda J. Automatic selection check of a magnetic core memory, Prace Instytutu Maszyn Matematycznych PAN, Warszawa, 1964.
16-33. Dańda J. Reliability control of operational ferrite memory type PAO 4096/28, Przegląd Elektroniki, 1964, t. 5, № 5.
16-34. Leifer M. S. A pulse-width temperature-compensated megacycle core memory. Trans. IEEE, 1964, v. CE-83, № 72.
16-35. Sorensen A. A. Digital circuit reliability through redundancy. Electron. Reliability a. Microminiaturization, 1962, № 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

КРАЙЗМЕР ЛЕОНИД ПАВЛОВИЧ

УСТРОЙСТВА ХРАНЕНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Редакторы Ю. Л. Тимаев, Б. И. Леонова
Художественный редактор Г. А. Гудков
Технический редактор Е. М. Соболева
Корректор В. А. Кипрушев

Сдано в производство 4/VI 1969 г. Подписано к печати 18/IX 1969 г. М-50803. Печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 22. Бум. л. 9,75. Бумага типографская № 3. 60×90[1]/16. Тираж 10 000 экз. Цена 1 р. 28 к. Заказ 543.

Ленинградское отделение издательства «Энергия», Марсово поле, 1.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» им. А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.